



**Pedro Miguel
Mendonça Lopes**

**Efeito do balastro nas propriedades de
geossintéticos em vias-férreas**



**Pedro Miguel
Mendonça Lopes**

Efeito do balastro nas propriedades de geossintéticos em vias-férreas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para o cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Dra. Margarida Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Dra. Maria de Lurdes Lopes, Professora Catedrática do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Trabalho realizado no âmbito do projecto FCT PTDC/ECM/099087/2008 e COMPETE, FCOMP-01-0124-FEDER-009724

O júri

Presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutor António Agostinho Martins Mendonça

Director de Unidade da Empresa Soares da Costa S.A.

Prof^a. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes

Professora Catedrática do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos

Na finalização deste trabalho, não posso deixar de expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste trabalho, nomeadamente:

- à Professora Doutora Margarida Pinho Lopes, pela orientação, ensinamentos e sugestões, pela disponibilidade total e apoio prestado durante a realização deste trabalho;
- ao Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e em particular à Professora Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes;
- ao projecto de investigação FCT PTDC/ECM/099087/2008 e COMPETE, FCOMP-01-0124-FEDER-009724, pelo apoio financeiro manifestado no decurso do presente trabalho;
- à minha família, em especial aos meus pais e irmã, pelo carinho, paciência, incentivo e disponibilidade que sempre demonstraram no decorrer deste ultimo ano;
- ao David e à Ana Rosete pela ajuda prestada no laboratório;
- a todos os meus amigos que não convivendo comigo directamente na realização deste trabalho sempre me motivaram na sua concretização;

Palavras-chave

Geossintéticos, vias-férreas, abrasão, danificação durante a instalação (DDI), durabilidade, comportamento mecânico de curto prazo.

Resumo

A incorporação de geossintéticos nas obras de engenharia civil é prática comum e as estruturas ferroviárias não são excepção. Neste campo, os geossintéticos apresentam inúmeras vantagens, entre as quais se destacam as técnicas, a economia, a rapidez de aplicação (especialmente importante nas obras ferroviárias de reabilitação, em que as intervenções estão limitadas) e as ambientais.

Nas estruturas ferroviárias a incorporação dos geossintéticos é feita ao nível da infraestrutura podendo esta ser efectuada na interface entre a plataforma e o sub-balastro ou, a mais comum, na interface sub-balastro e balastro. É de salientar que, independentemente da interface em que estes materiais são colocados, estes estão sujeitos a elevados graus de severidade, pelo facto de os materiais granulares aí utilizados possuírem características de maior agressividade e pelo facto de as cargas aqui aplicadas serem de maior magnitude, quando comparadas com outras aplicações correntes, nomeadamente obras rodoviárias.

No presente trabalho efectuou-se uma avaliação dos efeitos resultantes da abrasão, da danificação durante a instalação (DDI) e da combinação destes, sobre alguns geossintéticos utilizados em obras ferroviárias: um geotêxtil, um geocompósito de reforço e uma geogrelha. Para a simulação dos fenómenos de DDI foi utilizado o material granular que vulgarmente se utiliza na concepção da camada de balastro. Com esta campanha de ensaios pretende-se caracterizar o efeito destes danos nas propriedades dos referidos geossintéticos, em particular no seu comportamento mecânico de curto prazo (através de ensaios de tracção).

Destes ensaios conclui-se que os danos induzidos provocam uma redução de resistência à tracção sendo, essa redução, manifestamente notória nas amostras do geocompósito e da geogrelha submetidas à abrasão e à combinação desta com a DDI. Tal facto ocorre devido à elevada exposição dos elementos que conferem as características resistentes destes materiais, nomeadamente os filamentos e as barras, ambos em poliéster. Dessa exposição resultam coeficientes de redução de elevada amplitude, necessitando estes porém, de confirmação por intermédio de ensaios de campo e de ensaios que permitam correlacionar o nível de danificação induzido laboratorialmente e o nível de danificação do geossintético ao fim do período de vida útil da infra-estrutura na qual este se insere.

Keywords

Geosynthetics, railways, abrasion, damage during installation (DDI), durability, short-term mechanical behavior.

Abstract

The incorporation of geosynthetics in civil engineering works is common and the railway tracks are no exception. In this field, geosynthetics have several advantages, among which some can be highlighted technical, economical, speed of application (especially important in the rehabilitation of railway works, in which interventions are limited) and environmental.

The incorporation of geosynthetics in railway structures is done at the infrastructure level, at the interface between the platform and the sub-ballast or, more commonly, at the interface between the sub-ballast and the ballast. Note that, regardless of the interface where these materials are placed, they are subject to high degrees of severity, because the granular materials used therein are more aggressive and the fact that the loads applied in such structures are of greater magnitude, compared with other running applications, including road works.

In the present study an assessment of the effects of abrasion, damage during the installation (DDI) and the combination of these was carried out, on some of geosynthetics used in railway construction: a geotextile, a reinforcement geocomposite and a geogrid. To simulate the phenomenon of DDI the granular material considered was the one that is commonly used in the design of the ballast layer. With this series of tests it was intended to characterize the effect of damage on the properties of these geosynthetics, particularly in the short-term mechanical behavior (through tensile tests).

From these tests it was concluded that the damage induced caused a reduction in tensile strength and this reduction is clearly evident in samples of the geocomposite and the geogrid subjected to abrasion and its combination with the DDI. This fact is due to the high exposition of the elements that confer resistance characteristics of these materials, including filaments and bars, both in polyester. This exposition resulted in a significant increase of the corresponding reduction factors, this needs confirmation through field trials and tests, that will allow establishing a correlation between the level of real damage and the level of laboratory-induced damage to the geosynthetic at the end of the life of the infrastructure where it is included

Índice

1.	Considerações Iniciais	1
1.1.	Introdução	1
1.2.	Estrutura da dissertação	2
2.	Aspectos relativos aos geossintéticos	3
2.1.	Resenha histórica	3
2.2.	Geossintéticos	3
2.2.1.	Preâmbulo	3
2.2.2.	Tipo de geossintéticos e composição	4
2.2.3.	Funções e aplicações dos geossintéticos	5
2.3.	Durabilidade dos geossintéticos	6
2.3.1.	Introdução	6
2.3.2.	Mecanismos de degradação	7
2.4.	Aplicabilidade dos geossintéticos nas vias-férreas.....	10
2.4.1.	Vias-férreas.....	10
2.5.	Desempenho dos geossintéticos nas vias-férreas	13
2.5.1.	Introdução	13
2.5.2.	Desempenho	14
2.6.	Danificação de geossintéticos.....	17
2.6.1.	Danificação durante a instalação	17
2.6.2.	Abrasão	19
3.	Estudo laboratorial dos fenómenos de danificação durante a instalação e da abrasão de geossintéticos.....	21
3.1.	Introdução	21
3.2.	Geossintéticos utilizados	22
3.3.	Procedimentos dos ensaios	23
3.3.1.	Ensaio de caracterização do balastro	23
3.3.2.	Ensaio de tracção	25
3.3.3.	Ensaio de danificação durante a instalação - DDI.....	31
3.3.4.	Ensaio de abrasão	35
3.4.	Apresentação dos resultados.....	41
3.4.1.	Geotêxtil não tecido (GTX-N).....	42
3.4.2.	Geocompósito de reforço (GCR).....	54

3.4.3.	Geogrelha tecida (GGR-T)	70
4.	Análise de resultados	83
4.1.	Discussão dos resultados	83
4.1.1.	Geotêxtil não tecido (GTX-N).....	83
4.1.2.	Geocompósito de reforço (GCR).....	93
4.1.3.	Geogrelha tecida (GGR-T)	101
4.2.	Comparação dos resultados obtidos	108
4.3.	Conclusões.....	111
5.	Desenvolvimentos futuros	117
	Referências Bibliográficas.....	119

Índice de figuras

Figura 1. Corte esquemático da secção de uma via-férrea convencional [adaptado de Tan (2002) por Pinto (2005)].....	11
Figura 2. Esquema representativo do equipamento em escala real “Vibrogir” [adaptado de Nancey <i>et al.</i> (2002) por Pinto (2005)].....	15
Figura 3. Materiais utilizados: a) Geotêxtil não-tecido (GTX-N); b) Geocompósito unidireccional (GCR); c) Geogrelha tecida (GGR-T).	22
Figura 4. Procedimento do ensaio de Los Angeles para balastro (segundo NP EN 13450:2005)	24
Figura 5. Garras utilizadas nos ensaios de tracção do GTX e do GCR: a) suporte das garras de cunha; b) garras de face rugosa; c) garras de face lisa em borracha.	27
Figura 6. Ensaio de tracção de um provete do geotêxtil com as garras de face rugosa e com colagens: a) provete antes da rotura; b) provete após rotura.	28
Figura 7. Ensaio de tracção de um provete de geotêxtil, pormenor da descolagem e escorregamento do provete.	28
Figura 8. Ensaio de tracção de um provete do geotêxtil com as garras de face rugosa: a) provete antes do ensaio; b) provete após interrupção do ensaio e com as garras de face lisa; c) provete durante o ensaio; d) provete após a rotura.	28
Figura 9. Preparação dos provetes de GCR: a) provete após corte; b) aplicação da cola nas extremidades; c) colocação dos varões de 6mm; d) provete após colagem.	29
Figura 10. Dimensão dos provetes para o ensaio de tracção: a) do geotêxtil; b) do geocompósito.....	29
Figura 11. Garras cilíndricas utilizadas nos ensaios de tracção da geogrelha: a) aspecto geral; b) em pormenor.	30
Figura 12. Ensaio de tracção de um provete da geogrelha com as garras de face rugosa e com colagem: a) provete antes do ensaio; b) provete após interrupção do ensaio.....	30
Figura 13. Ensaio de tracção de um provete da geogrelha com as garras cilíndricas: a) posicionamento do provete relativamente às pegas; b) provete antes do ensaio; c) provete após rotura.	31
Figura 14. Equipamento de simulação da DDI: a) equipamento utilizado; b) caixa de danificação e placa de compactação; c) material granular utilizado.	32
Figura 15. Curva granulométrica do solo utilizado no ensaio laboratorial de danificação.	34
Figura 16. Metodologia do ensaio de DDI	34

Figura 17. Equipamento de simulação da abrasão: a) equipamento utilizado; b) película abrasiva P100.....	35
Figura 18. Fixação da película abrasiva à placa inferior do equipamento.	36
Figura 19. Colocação do provete na placa superior do equipamento de simulação da abrasão, na extremidade que não possui esticador: a) fixação do provete nas garras; b) provete alinhado sob a placa superior.....	36
Figura 20. Colocação do provete na placa superior do equipamento de simulação da abrasão, na extremidade que possui esticador: a) alinhamento do provete; b) fixação do provete na garra.	37
Figura 21. Ajuste do provete à placa superior através do esticador: a) provete antes do ajuste; b) provete após ajuste.	37
Figura 22. Montagem do provete de geotêxtil no ensaio laboratorial de abrasão, após fixação à placa superior com abrasivo P24: a) película abrasiva P24; b) alinhamento do abrasivo P24 na extremidade sem esticador; c) provete e abrasivo P24 fixos sob a garra na extremidade sem esticador; d) abrasivo P24 fixo na extremidade que possui esticador e geotêxtil solto.	38
Figura 23. Esquema de ensaio para a simulação da abrasão na geogrelha: a) fixação do provete à placa estacionária; b) aspecto final após colocação dos pesos sobre a placa.	39
Figura 24. Metodologia do ensaio de Abrasão.	40
Figura 25. Plano de ensaios.	40
Figura 26. Definição das grandezas: a) módulo de rigidez; b) módulos de rigidez secante.	41
Figura 27. Alvos utilizados na medição da extensão: a) vista frontal; b) vista posterior.	42
Figura 28. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média.	43
Figura 29. Proвете de GTX-N após ensaio de abrasão: a) face que foi sujeita à abrasão; b) face que ficou em contacto com a película abrasiva P24.	44
Figura 30. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de abrasão.	45
Figura 31. Modo de rotura dos provetes do GTX-N submetidos à abrasão: a) rotura junto aos apoios de fixação; b) rotura com um desenvolvimento diagonal.	46
Figura 32. Danos induzidos nos provetes de geotêxtil (GTX-N): a) vista geral; b) abrasão superficial; c) contusões superficiais; d) perfuração do provete.	47
Figura 33. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	48

Figura 34. Modo de rotura dos provetes de referência para a DDI: a) rotura junto aos apoios de fixação; b) rotura com um desenvolvimento diagonal; c) aumento progressivo de uma pequena perfuração.....	49
Figura 35. Danos induzidos nos provetes de geotêxtil (GTX-N): a) vista geral; b) pormenor de uma contusão superficial.	49
Figura 36. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de DDI.	50
Figura 37. Modo de rotura dos provetes de geotêxtil (GTX-N) submetidos à DDI: a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete.	51
Figura 38. Aspecto apresentado pelo geotêxtil após ensaios de DDI e de Abrasão.....	52
Figura 39. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.	53
Figura 40. Modo de rotura dos provetes de geotêxtil (GTX-N) submetidos à DDI e à abrasão: a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete.	53
Figura 41. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) intactos e respectiva curva média.....	55
Figura 42. Modo de rotura dos provetes intactos do geocompósito (GCR): a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete; c) pormenor do deslocamento relativo entre os filamentos de PET e o material geotêxtil.	56
Figura 43. Provede de geocompósito: a) antes do ensaio; b) após ensaio de abrasão.....	57
Figura 44. Aspecto geral do provede de geocompósito após abrasão.	57
Figura 45. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão e respectiva curva média.	58
Figura 46. Comportamento à tracção dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão: a) mobilização da capacidade resistente dos filamentos de poliéster (“pico 1”); b) destacamento dos filamentos exteriores (decaimento da resistência à tracção); c) provede após rotura (“pico 2”).	59
Figura 47. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão e respectiva curva média (apenas o “pico 1”).	61
Figura 48. Danos induzidos nos provetes de geocompósito: a) vista geral; b) perfuração do material geotêxtil; c) corte total e parcial dos filamentos de PET; d) empolamento dos filamentos de PET.	62
Figura 49. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito após ensaios de referência para a DDI.	63

Figura 50. Modo de rotura dos provetes do geocompósito após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	64
Figura 51. Danos induzidos nos provetes de geocompósito: a) vista geral; b) perfuração do material geotêxtil; c) corte total e parcial dos filamentos de PET; d) empolamento dos filamentos de PET.	65
Figura 52. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito após ensaios de DDI.	66
Figura 53. Proвете de geocompósito após ensaio de abrasão: a) vista geral; b) pormenor dos danos observados.	67
Figura 54. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão e respectiva curva média.	68
Figura 55. Comportamento à tracção dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão: a) destacamento dos filamentos exteriores (decaimento da resistência à tracção); b) provete após rotura (“pico 2”).	68
Figura 56. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão e respectiva curva média (apenas o “pico1”).	70
Figura 57. Alvos utilizados na medição da extensão: a) vista frontal; b) vista posterior; c) modo de fixação dos alvos.	71
Figura 58. Curvas força-extensão dos provetes intactos da geogrelha e respectiva curva média.	72
Figura 59. Deformação ocorrida nas pegas: a) pega superior; b) pega inferior.	72
Figura 60. Modo de rotura dos provetes intactos da geogrelha: a) vista geral; b) danos ocorridos; c) aspecto pormenorizado de uma barra longitudinal antes do ensaio; d) aspecto de uma barra longitudinal após o ensaio.	73
Figura 61. Faces da geogrelha.	74
Figura 62. Danos observados nos provetes da geogrelha após abrasão: a) vista geral; b) desgaste das barras longitudinais; c) desgaste das barras transversais.	74
Figura 63. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após abrasão e respectiva curva média.	75
Figura 64. Comportamento à tracção dos provetes da geogrelha após abrasão: a) provete antes do ensaio; b) rotura do provete (vista geral); c) modo de rotura das barras longitudinais.	76
Figura 65. Danos induzidos nos provetes da geogrelha: a) abrasão superficial; b) corte total e parcial das barras; c) esmagamento das barras.	76
Figura 66. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após ensaios de referência para a DDI.	77

Figura 67. Danos induzidos nos provetes da geogrelha: a) abrasão superficial; b) corte total e parcial das barras; c) esmagamento das barras.	78
Figura 68. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após ensaios de DDI.	79
Figura 69. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após DDI e abrasão e respectiva curva média.....	81
Figura 70. Representação das curvas médias força-extensão do geotêxtil: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.	83
Figura 71. Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média do geotêxtil nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.	84
Figura 72. Geotêxtil: a) valores residuais (%) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação (%).	85
Figura 73. Danos provocados pela abrasão nos provetes de geotêxtil após DDI: a) vista geral; b) pormenor da reorientação dos filamentos.	86
Figura 74. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão do GTX.	87
Figura 75. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geotêxtil intacto.	87
Figura 76. Valores residuais (em %) da resistência à tracção dos geotêxteis para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.....	90
Figura 77. Variação da resistência à tracção em termos de valores residuais dos geotêxteis ensaiados por Pinto (2005), GTX1 e no âmbito do presente trabalho, GTX-N.	92
Figura 78. Coeficientes de redução obtidos para os geotêxteis ensaiados por Pinto (2005), Rosete (2010) e no âmbito do presente trabalho.	93
Figura 79. Representação das curvas médias força-extensão do geocompósito: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.	94
Figura 80. Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média do geocompósito nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.....	94
Figura 81. Geocompósito: a) valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação correspondentes (em %).	96
Figura 82. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão do GCR.	97
Figura 83. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geocompósito intacto.....	98

Figura 84. Valores residuais (em %) da resistência à tracção do GCR e do GCR1 para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.....	100
Figura 85. Representação das curvas médias força-extensão da geogrelha para as condições: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.	102
Figura 86. Representação da curva força-extensão do provete da GGR-T mais próximo da curva média para as situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.....	102
Figura 87. Geogrelha: a) valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação (em %) correspondentes.	103
Figura 88. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão para a GGR-T..	104
Figura 89. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente à geogrelha intacta.....	105
Figura 90. Geogrelhas: a)geogrelha extrudida biaxialmente (GGR-E) utilizada por Rosete (2010); b) geogrelha tecida (GGR-T).....	106
Figura 91. Valores residuais (em %) da resistência à tracção das geogrelhas para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.....	107
Figura 92. Processo de rotura de uma barra da geogrelha extrudida: a) exemplificação da barra da geogrelha antes do carregamento; b) comportamento durante o carregamento; c) eventual tipo de rotura.	108
Figura 93. Comparação dos resultados, em termos de resistência à tracção (kN/m), para os geossintéticos estudados no âmbito do presente trabalho.	109

Índice de tabelas

Tabela 1. Tipo de polímeros utilizados no processo de fabrico dos diferentes tipos de geossintéticos [adaptado de Shukla (2002)].	4
Tabela 2. Principais funções dos geossintéticos [IGS-Portugal (2009b)].	6
Tabela 3. Consequência dos danos induzidos para algumas funções dos geossintéticos [Paula (2003)].	10
Tabela 4. Factores que contribuem para a danificação dos geossintéticos [adaptado de Watn e Chew (2002) por Rosete (2010)].	18
Tabela 5. Processos de abrasão [adaptado de Van Dine <i>et al.</i> (1982) por Pinto (2005)].	20
Tabela 6. Propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo na direcção de fabrico.	22
Tabela 7. Alterações introduzidas pela norma NP EN 13450:2005.	23
Tabela 8. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) intacto.	42
Tabela 9. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de abrasão.	45
Tabela 10. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	47
Tabela 11. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil após a realização dos ensaios de DDI.	50
Tabela 12. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.	52
Tabela 13. Resultados do ensaio de tracção dos provetes intactos do geocompósito.	54
Tabela 14. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão.	58
Tabela 15. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	59
Tabela 16. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão (apenas o “pico 1”).	60
Tabela 17. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	62
Tabela 18. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI.	65
Tabela 19. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.	67

Tabela 20. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	69
Tabela 21. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão (apenas o “pico 1”).	69
Tabela 22. Resultados do ensaio de tracção dos provetes intactos da geogrelha.	71
Tabela 23. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de abrasão.	75
Tabela 24. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	77
Tabela 25. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após os ensaios de DDI.	79
Tabela 26. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.	80
Tabela 27. Coeficientes de redução do geotêxtil GTX-N.	88
Tabela 28. Propriedades dos geotêxteis, na direcção de fabrico, estudados por Pinto (2005) e por Rosete (2010).	89
Tabela 29. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção dos últimos trabalhos desenvolvidos neste âmbito.	90
Tabela 30. Coeficientes de redução do geocompósito.	98
Tabela 31. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção do GCR e GC1.	100
Tabela 32. Coeficientes de redução da geogrelha (GGR-T).	105
Tabela 33. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção das geogrelhas GGR-E e GGR-T.	106

Acrónimos

T_{Nom} - Valor nominal da resistência à tracção

T_{max} - Valor máximo da resistência à tracção

ϵ_{max} - Extensão para a resistência máxima à tracção

$J_{sec(2\%)}$ - Módulo de rigidez secante para a extensão de 2%

$J_{sec(5\%)}$ - Módulo de rigidez secante para a extensão de 5%

$J_{sec(10\%)}$ - Módulo de rigidez para a extensão de 10%

$J_{sec(\epsilon_{max})}$ - Módulo de rigidez para a extensão correspondente à extensão de rotura

U - Módulo de robustez

B - largura nominal do provete (m)

N_m - número mínimo de elementos a traccionar num metro de largura do produto a ensaiar

N_s - número de elementos a traccionar existentes no provete

V.R. - Valores residuais

PP - Polipropileno

PET - Poliéster

PA - Poliamidas

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de vinilo

PE - Polietilenos

PEAD - Polietileno de alta densidade

PEMBD - Polietileno de muito baixa densidade

CPE - Polietileno clorinado

PECS - Polietileno clorossulfunado

GTX-N - Geotêxtil não tecido

GCR - Geocompósito de reforço

GGR-T - Geogrelha tecida

GGR-E - Geogrelha extrudida

INT - Amostra intacta

ABR - Amostra submetida à abrasão

DDI - Danificação durante a instalação

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

A incorporação de geossintéticos nas obras de engenharia civil é prática comum e as estruturas ferroviárias não são excepção. Neste campo, os geossintéticos apresentam inúmeras vantagens, entre as quais se destacam as técnicas, a economia, a rapidez de aplicação (especialmente importante nas obras ferroviárias de reabilitação, em que as intervenções estão limitadas) e as ambientais.

Nas estruturas ferroviárias a incorporação dos geossintéticos é feita ao nível da infraestrutura podendo esta ser efectuada na interface entre a plataforma e o sub-balastro ou, a mais comum, na interface sub-balastro e balastro. É de salientar que, independentemente da interface em que estes materiais são colocados, estes estão sujeitos a elevados graus de severidade, pelo facto de os materiais granulares aí utilizados possuírem características de maior agressividade e pelo facto de as cargas aqui aplicadas serem de maior magnitude, quando comparadas com outras aplicações correntes, nomeadamente obras rodoviárias.

A aplicação de geossintéticos nas estruturas ferroviárias constitui uma solução economicamente atractiva, principalmente nas intervenções de reabilitação, pois, a sua inserção permite um aumento das velocidades de circulação assim como da amplitude das cargas transportadas. Por outro lado, estes materiais também desempenham um papel importante no que concerne à segurança de circulação, pois, trata-se de meios de transporte cuja afluência populacional tem crescido substancialmente o que obriga à exigibilidade de mais e melhores condições de segurança.

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010) constata-se que existe, por parte de diversas entidades relacionadas com os geossintéticos, uma enorme preocupação na compreensão do comportamento destes produtos face às solicitações a que se encontram submetidos nas diversas estruturas das quais estes materiais fazem parte. Muitas destas solicitações são englobadas nos aspectos relativos à durabilidade dos geossintéticos.

Dentro do estudo da durabilidade dos geossintéticos é de salientar os efeitos de degradação sofridos durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra, pois, originam reduções significativas nas propriedades dos geossintéticos. Porém, estas degradações originam efeitos que são mais gravosos no caso das estruturas ferroviárias, devido às características agressivas dos agregados usados neste tipo de construções. Regra geral, o contacto com esses agregados (em geral, o balastro) agrava a situação, ou seja, se um geossintético apresenta um

pequeno corte, quando colocado em contacto com o material do balastro esse corte poderá aumentar de dimensão. Como resultado, pode ficar comprometido o desempenho do geossintético.

No presente trabalho, são apresentados resultados de ensaios de danificação durante a instalação (DDI) e de abrasão, sobre alguns geossintéticos, em particular em materiais utilizados em obras ferroviárias. Deste modo pretende-se caracterizar o efeito destes danos nas propriedades dos referidos geossintéticos, em particular no seu comportamento mecânico de curto prazo (através de ensaios de tracção), sendo este o objectivo do presente trabalho. É de salientar que os ensaios de DDI foram efectuados com material granular que vulgarmente se utiliza na concepção da camada de balastro. Tal situação permite uma avaliação mais realista, do efeito da camada de balastro sobre as propriedades referidas dos geossintéticos.

1.2. Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se um breve enquadramento das temáticas abordadas assim como os objectivos do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma apresentação geral dos geossintéticos, no qual se apresenta uma descrição sucinta dos tipos, dos materiais, das propriedades, das funções e dos principais agentes e mecanismos de degradação dos geossintéticos.

Neste capítulo também se faz referência à aplicabilidade dos geossintéticos nas vias-férreas. Especificam-se os principais elementos constituintes das vias-férreas, dando especial relevo à camada de balastro, apresenta-se o desempenho dos geossintéticos sobre a acção de cargas cíclicas, como é o caso das obras ferroviárias, e, por último, descrevem-se os efeitos da DDI e da abrasão nos geossintéticos.

Nos Capítulos 3 e 4 é apresentada toda a componente prática do presente trabalho, que incide sobre a avaliação laboratorial da durabilidade dos geossintéticos no que se refere à danificação durante a instalação (DDI) e à abrasão. O Capítulo 3 centra-se na descrição dos equipamentos e dos ensaios efectuados e na apresentação dos resultados obtidos. No Capítulo 4 faz-se a análise de resultados o qual inclui a discussão e a comparação dos resultados obtidos e por último apresentam-se as principais conclusões.

Por último, no Capítulo 5, são apresentados possíveis desenvolvimentos futuros.

2. ASPECTOS RELATIVOS AOS GEOSSINTÉTICOS

2.1. Resenha histórica

Os geossintéticos apesar de serem materiais relativamente novos têm tido um franco desenvolvimento. A primeira aplicação de um geotêxtil tecido de algodão, em reforço de estradas, nos Estados Unidos, ocorreu por volta de 1930 [Ferreira Gomes (2001)].

Porém, é no apogeu do aparecimento dos polímeros sintéticos que surgem, na década de 50, os primeiros geossintéticos poliméricos. Os primeiros geossintéticos a serem fabricados foram os geotêxteis, cuja primeira aplicação, segundo Ferreira Gomes (2001), data de 1950 e ocorreu na Flórida. É após a década de 70, que se verifica um grande desenvolvimento com o aparecimento de outros materiais como as geomembranas, geogrelhas, geocompósitos e outros, tendo levado ao termo geossintético já nos anos 80, como uma designação mais genérica, englobando portanto os geotêxteis, as geomembranas e todos os produtos afins [Ferreira Gomes (2001)].

Em Portugal os geossintéticos começaram a ser aplicados regularmente desde 1980, principalmente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, é a partir de meados da década de 90, associado à construção da rede nacional de aterros de resíduos urbanos, que é dado o grande impulso, quer na aplicação, quer na procura de conhecimentos acerca dos geossintéticos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

A procura incessante de informações acerca destes materiais em Portugal levou, segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), à criação em 1999 do Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, à criação da Associação Portuguesa de Geossintéticos.

2.2. Geossintéticos

2.2.1. Preâmbulo

O termo geossintético é usado para descrever uma família de produtos sintéticos utilizados para solucionar problemas geotécnicos.

De acordo com IGS-Portugal (2009a) o termo geossintético designa um material em que pelo menos um dos seus componentes é um polímero sintético ou natural em forma de tela, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contacto com o solo e/ou outros materiais em aplicações de engenharia civil e geotécnica.

Estes produtos são constituídos por uma grande diversidade de materiais e formas, cada um adequado a um determinado uso ou necessidade. Estas questões são abordadas, com algum detalhe, na secção seguinte. A nível geotécnico, são inúmeras as aplicações deste tipo de produtos. De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), a aplicação dos geossintéticos surge em obras marítimas, vias de comunicação, obras hidráulicas e obras de engenharia ambiental. A título de exemplo tem-se: obras rodoviárias e ferroviárias, os aterros, as estruturas de contenção, protecção de taludes, drenagens, etc.

2.2.2. Tipo de geossintéticos e composição

Os geossintéticos são maioritariamente constituídos por materiais plásticos. Os plásticos podem ser divididos em dois grupos: os termoplásticos, que podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento, respectivamente; e os plásticos termoendurecidos, que endurecem após moldagem, não podendo voltar a ser fundidos por acção do calor [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

De entre estes dois tipos de plásticos, os mais utilizados são os termoplásticos, em que, de acordo com Shukla (2002), os mais comuns são: os poliésteres (PET), o polipropileno (PP), as poliamidas (PA) ou nylons, o poliestireno (PS), o policloreto de vinilo (PVC), os polietilenos (PE), nomeadamente polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de muito baixa densidade (PEMBD), polietileno de média densidade (PEMD), polietileno clorinado (CPE), polietileno clorossulfunado (PECS). A Tabela 1 relaciona o material polimérico com os respectivos tipos de geossintéticos que os incorporam.

Tabela 1. Tipo de polímeros utilizados no processo de fabrico dos diferentes tipos de geossintéticos [adaptado de Shukla (2002)].

Geossintético	Polímero
Geotêxteis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PEAD, PET, PP
Georredes	PEMD, PEAD
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

A diferenciação destes produtos surge, essencialmente, devido às diferentes características que apresentam, sendo estas diferenças ditadas pelo tipo de constituintes e pela própria estrutura. Deste modo, de acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), os principais tipos de geossintéticos são: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas e geocompósitos.

No que concerne aos componentes dos geossintéticos, que se obtêm por extrusão ou fiação líquida do polímero, estes, de acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), apresentam as seguintes formas:

- a) Filamento contínuo circular, cujo diâmetro médio é da ordem das frações dos milímetros e de comprimento indefinido. São utilizados individualmente, sob a forma de monofilamentos (apenas um filamento contínuo alinhado) ou sob a forma de multifilamentos (vários filamentos juntos e devidamente alinhados).
- b) Fibra curta, resulta do corte, em pedaços de pequeno comprimento, dos filamentos contínuos. Estas fibras podem ser combinadas de forma a darem origem a fios sendo estes obtidos pelo entrelaçamento ou enrolamento das fibras curtas.
- c) Tira plana contínua ou fitas, apresenta uma largura de cerca de 1 a 3 milímetros, uma espessura da ordem das frações de milímetros e um comprimento indefinido. Sendo estas, utilizadas individualmente ou em conjunto (cortadas e parcialmente ligadas) dando origem a cordões.
- d) Folha ou película, cuja largura pode ter vários metros e a espessura varia entre uma fracção de milímetro (película) e vários milímetros (folha).

2.2.3. Funções e aplicações dos geossintéticos

Os geossintéticos surgiram como resposta a vários problemas tradicionais da engenharia civil, tais como a estabilização e reforço de solos moles, a drenagem de solos e a impermeabilização de, por exemplo, depósitos de produtos contaminantes. Esta família de produtos constitui uma resposta eficiente e economicamente atractiva que oferece, quando necessário, uma elevada resistência mecânica, estabilidade química, e uma série de outras propriedades que a engenharia há tempos procurava [MPZ (2010)].

Como materiais sintéticos que são, ao serem fabricados industrialmente, podem sofrer algumas modificações no que concerne às suas propriedades físicas e químicas, tendo em vista a aplicação a que se destinam. Na Tabela 2 apresentam-se, de forma reduzida, as principais funções dos geossintéticos.

Em determinada aplicação, os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções. Deste modo, torna-se imprescindível, a definição das diversas funções e a sua hierarquização de modo a definir-se as características que o geossintético deve possuir para desempenhar adequadamente as funções para que foi escolhido [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Tabela 2. Principais funções dos geossintéticos [IGS-Portugal (2009b)].

Função	Descrição
Separação	Utilização do geossintético para prevenção da mistura de solos adjacentes dissimilares e/ou outros materiais.
Filtragem	Utilização do geossintético para a retenção do solo ou de outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem de fluidos.
Drenagem	Utilização do geossintético para recolha e transporte de fluidos.
Protecção	Utilização do geossintético para evitar ou reduzir danos locais de uma outra superfície ou camada.
Reforço	Utilização da capacidade de resistência à tracção do geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou de outros materiais de construção.
Barreira de fluidos (Impermeabilização)	Utilização do geossintético para limitar a migração de fluidos ou gases.
Controlo da erosão superficial	Utilização do geossintético para prevenção ou limitação do movimento do solo ou outras partículas à superfície, por acção da água da chuva e/ou do vento.

2.3. Durabilidade dos geossintéticos

2.3.1. Introdução

Com a crescente utilização dos materiais geossintéticos nas diversas aplicações da engenharia civil surgiu a necessidade de se obter conhecimentos aprofundados no que concerne à durabilidade destes materiais. Como a maioria das obras de engenharia são projectadas para um dado período de vida útil, torna-se imprescindível, que os materiais que estas incorporam, funcionem de forma satisfatória durante esse tempo, sem que haja a necessidade de se proceder a uma substituição do material e com o mínimo de manutenção.

Para garantir que os geossintéticos funcionam durante o período de tempo definido é necessário prever quais as condições a que estes estarão submetidos e de que forma essas condições afectam as suas propriedades [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Deste modo, torna-se necessário a adopção de critérios de sobrevivência dos geossintéticos, de modo que estes tenham capacidade para resistir aos processos de degradação que vão ocorrendo no decurso do tempo.

Portanto, pode-se afirmar que a durabilidade incide sobre todos os aspectos referentes às alterações irreversíveis nas propriedades dos materiais em estudo decorrentes da sua utilização e do tempo, incluindo todos os agentes ambientais que contribuem para a degradação, bem como as acções mecânicas aplicadas [Brown e Greenwood (2002), citados por Pinho-Lopes e Lopes (2010)]. Ou seja, a durabilidade de um dado material está associada à capacidade de este preservar as suas propriedades apesar dos condicionalismos externos, ao longo da sua vida útil.

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), a avaliação da durabilidade dos geossintéticos, em geral, passa pelas seguintes fases:

- Identificar a aplicação dos materiais e as funções associadas;
- Identificar as propriedades funcionais dos geossintéticos;
- Analisar quais os agentes de degradação que, ao longo do tempo de vida útil do geossintético, podem conduzir a alterações dessas propriedades;
- Realizar ensaios de durabilidade, sob condições reais ou através de simulações, podendo ainda recorrer-se a ensaios acelerados, caso sejam válidos;
- Avaliar os efeitos sinérgicos entre os diferentes agentes e mecanismos de degradação relevantes para a aplicação em causa;
- Definir os valores para os coeficientes de redução a aplicar no dimensionamento dos geossintéticos, de forma a garantir um determinado grau de confiança na estimativa do tempo de vida útil destes materiais, ou dos valores das suas propriedades no fim do tempo de vida útil previamente estabelecido.

Shukla (2002) refere que, em termos da engenharia, a durabilidade dos geossintéticos pode ser expressa como uma redução da resistência. Deste modo, de acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), a avaliação da durabilidade dos geossintéticos tem-se realizado em termos de ensaios mecânicos e não de avaliação das alterações microestruturais sendo, porém, estas últimas as responsáveis pela alteração do comportamento mecânico dos geossintéticos.

2.3.2. Mecanismos de degradação

As alterações das propriedades dos geossintéticos tanto podem ocorrer a curto como a longo prazo. De acordo com Paula (2003), os fenómenos de degradação que atingem os geossintético podem resultar da: acção interna (correspondente às alterações da matéria prima que o constitui); acção externa (agentes mecânicos, físicos, químicos ou bacteriológicos) ou deterioração durante o transporte, manuseamento e colocação em obra.

Porém, Koerner (1998), citado por Pinho-Lopes e Lopes (2010), considera que as questões alusivas à durabilidade dos geossintéticos podem ser agrupadas em dois subgrupos, sendo eles: as questões relativas à “endurance”, ou seja, à resistência durante o período de vida útil, que contempla a danificação sofrida pelos geossintéticos durante a instalação, a fluência, a relaxação de tensões, a abrasão e a fluência em compressão e as questões que se referem à degradação, isto é, as alusivas à oxidação, à acção da temperatura, o efeito das radiações ultravioleta, a hidrólise, os agentes químicos e biológicos.

Neste trabalho, para aprofundar o modo como os referidos agentes interferem na durabilidade dos geossintéticos, segue-se a divisão proposta por Paula (2003).

Acções internas:

No que concerne às degradações internas dos geossintéticos, segundo Paula (2003), verifica-se que os polímeros, sendo materiais sintéticos, podem, internamente, sofrer alterações estruturais, das quais, ao longo do tempo podem surgir alterações no material polimérico sem que essas alterações provoquem, *à priori*, a degradação do geossintético.

Acções externas (agentes mecânicos, físicos, químicos e biológicos):

Relativamente às acções externas, de foro mecânico, as mais preocupantes são as acções estáticas ou dinâmicas que induzem elevados incrementos de tensões. Como consequência destas acções salientam-se, de acordo com Pinto (2005): a perda de material devido à abrasão, que corresponde ao movimento friccional entre duas superfícies com determinada rugosidade, sendo mais evidente nos materiais britados (predominantemente dominados por arestas vivas); a relaxação de tensões, que corresponde à redução da tensão para uma deformação constante; e a fluência, que se refere ao aumento da deformação sob tensão constante. A relaxação de tensões é, normalmente, motivada por solicitações do tipo cíclico e depende do tipo de estrutura e do processo de fabrico do geossintético. A fluência é causada por solicitações do tipo estático, embora seja consequência directa do deslizamento entre cadeias poliméricas, o que corresponde a um factor interno que actua ao nível dos polímeros.

Outro processo de degradação diz respeito às acções físico-químicas, as quais compreendem as degradações fotoquímicas que são provocadas pela radiação UV e manifestam-se pela ruptura das ligações químicas nas macromoléculas dos polímeros e a degradação térmica, principalmente os ambientes térmicos quentes, que aceleram as reacções químicas e consequentemente a degradação polimérica. Porém, de acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), a gama de comprimentos de onda a que pertence a radiação ultravioleta do espectro solar que atinge a superfície terrestre, possui

energia suficiente para quebrar as ligações químicas presentes nas macromoléculas dos polímeros. A intensidade e a duração destas radiações são os factores preponderantes da degradação fotoquímica. No entanto, as acções adicionais do oxigénio, das temperaturas elevadas e da humidade facilitam essa degradação do polímero. De acordo com as mesmas autoras, os geossintéticos devem ser protegidos da luz solar de modo a minimizar os efeitos desta degradação. Para tal, deve-se envolver os geossintéticos com revestimentos opacos e estes devem ser armazenados em locais ao abrigo da luz.

Segundo estudos levados a cabo por Lopes *et al.* (2001), citados por Paula (2003) sobre a acção dos agentes atmosféricos em geotêxteis, especialmente as radiações UV, estes efeitos dependem do tipo de polímero que constitui o geotêxtil, da presença de aditivos anti-UV e do tipo de ligação dos filamentos. Recentemente, Carneiro (2009), levou a cabo uma campanha de ensaios de degradação fotoquímica a fim de avaliar a influência da quantidade de aditivos nos danos sofridos pelos geossintéticos, quando submetidos à radiação solar.

A degradação biológica deve-se à acção dos microorganismos podendo estes coexistir em condições ambientais distintas, porém, necessitam sempre de uma fonte de carbono para se desenvolverem e podem obtê-la a partir das reacções de degradação de materiais orgânicos, tais como os polímeros e os aditivos utilizados em geossintéticos [Elias (2000), citado por Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

A degradação química é provocada pela acção do oxigénio, dos iões metálicos, dos ácidos, das bases, dos solventes e da água. É de salientar que a degradação química depende da reactividade dos polímeros constituintes do geossintético aos agentes enumerados anteriormente. Estas interacções provocam alterações nas cadeias moleculares constituintes dos polímeros, que incluem quebra de ligações químicas e consequente diminuição do comprimento das cadeias moleculares, alteração química das mesmas, incorporação de iões estranhos nas cadeias, formação de espécies quimicamente activas, rotura das cadeias, etc. Naturalmente, essas alterações profundas acarretam modificações nas propriedades dos polímeros [Paula (2003)].

Deterioração durante o transporte, manuseamento e colocação em obra:

Durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra podem surgir degradações, tais como rasgões ou perfurações, que comprometerão a funcionalidade dos geossintéticos assim como o seu comportamento quer a longo como a curto prazo. De acordo com Paula *et al.* (2004), a danificação que os geossintéticos podem sofrer durante a instalação assume um lugar de destaque, face aos restantes mecanismos de degradação, uma vez que é, praticamente, inevitável e, como mencionado anteriormente, induz alterações no comportamento dos

geossintéticos. Na Tabela 3, apresentam-se algumas das consequências dos danos induzidos durante os processos de colocação. Dado que este é um dos agentes de degradação estudados neste trabalho, na secção 2.6 estas questões são abordadas com maior detalhe.

Tabela 3. Consequência dos danos induzidos para algumas funções dos geossintéticos [Paula (2003)].

Função do Geossintético	Consequência dos danos induzidos
Reforço	Redução da resistência
Filtração e/ou Separação	Perfuração \Rightarrow Redução da eficácia da função.
Barreira de Fluidos	Pequenos Cortes \Rightarrow Grandes Aberturas \Rightarrow Deixam de cumprir a sua função

2.4. Aplicabilidade dos geossintéticos nas vias-férreas

2.4.1. Vias-férreas

2.4.1.1. Introdução

As vias-férreas são parte integrante de um sistema de transporte que se baseia na circulação de comboios que se deslocam sobre carris. Este sistema de transporte surgiu com a implosão da revolução industrial pois foi, e continua a ser, o transporte terrestre com maior capacidade de carga, o que proporcionou uma maior mobilidade dos produtos assim como das matérias-primas essenciais ao normal desenvolvimento das unidades industriais. Recentemente, com o desenvolvimento tecnológico, estes meios de transporte, que outrora se destinavam, ao transporte de mercadorias, passaram a ser utilizados como meio de transporte de passageiros. Com este novo serviço e com a crescente velocidade de circulação, o nível de exigibilidade, no que concerne à segurança deste tipo de estrutura, aumentou consideravelmente, impondo-se limites de deformabilidade mais restritos. Deste modo, as vias-férreas estão muito associadas às regiões industrializadas, como a Europa e o extremo leste da Ásia e a locais muito povoados como é o caso da Índia.

No entanto, de acordo com Selig e Waters (1994) citado por Lim (2004), as entidades reguladoras, deste meio de transporte, preocupam-se essencialmente com a super-estrutura da via, deixando de lado as questões relativas à infra-estrutura. A constituição das vias-férreas é efectuada na secção seguinte.

Com a crescente procura de comboios de alta velocidade e movimentação de cargas pesadas, a deterioração da geometria da via tem sido reconhecida como a principal causa da necessidade de manutenção [Lu (2008)].

Lim (2004) associa o assentamento da infra-estrutura, que depende das condições locais, como sendo a causa da deterioração manifestada nas vias, porém, Selig e Waters (1994) citados por Lu (2008), vão mais além e afirmam que é a camada de balastro que constitui uma das principais fontes de deterioração da geometria da via.

2.4.1.2. Constituição

Tal como mencionado anteriormente, as vias-férreas podem ser decompostas segundo duas categorias: a super-estrutura e a infra-estrutura.

Da super-estrutura fazem parte os carris, elementos metálicos que contactam directamente com as rodas do comboio, as travessas, podendo ser de madeira ou de betão, que transmitem os esforços da super-estrutura para a infra-estrutura, e os elementos de fixação dos carris às respectivas travessas. Quanto à infra-estrutura, esta é composta, normalmente, por três camadas de solo designando-se cada uma delas por: balastro, sub-balastro e plataforma, respectivamente, de cima para baixo [Tan (2002), citado por Rosete (2010)].

Na Figura 1, apresenta-se um corte esquemático da secção de uma via-férrea convencional.

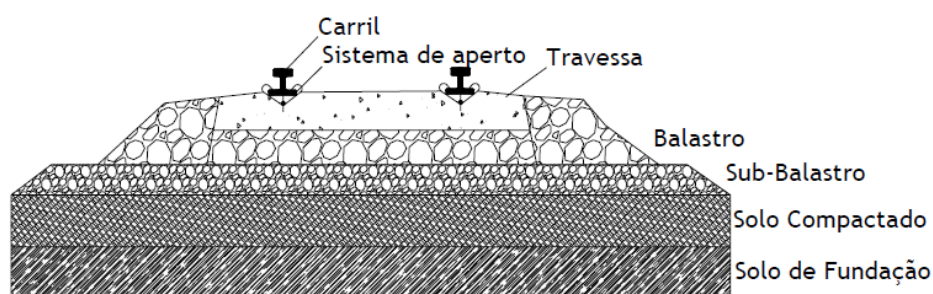


Figura 1. Corte esquemático da secção de uma via-férrea convencional [adaptado de Tan (2002) por Pinto (2005)].

Sendo a infra-estrutura a responsável pela deterioração das vias-férreas, na secção seguinte, especificam-se as principais características e funções das diversas camadas que a constituem, dando-se especial atenção à camada de balastro.

2.4.1.3. Características e funções dos elementos da infra-estrutura

O balastro ferroviário é um material granular, de dimensões que variam entre 10 – 60mm, colocado e compactado na camada superior da infra-estrutura, cuja espessura, normalmente, se enquadra

entre os 250 - 300mm, medida desde a base das travessas até à base do balastro, onde as travessas estão inseridas [Indraratna *et al.* (2006)].

As partículas são caracterizadas de forma independente em termos de petrologia, angularidade, durabilidade, forma e granulometria. Além disso, também é caracterizado o comportamento conjunto destas partículas em termos de atrito inter-partículas e força de contacto [Indraratna *et al.* (2006)].

A camada de balastro desempenha um papel importante no sistema da via-férrea. Deste modo, de acordo com Tan (2002), as principais funções desempenhadas pelo balastro são as seguintes:

1. Suportar as cargas verticais, laterais e longitudinais transmitidas às travessas e manter todos os elementos da super-estrutura na devida posição;
2. Proporcionar o necessário grau de resiliência e de absorção de energia para a via;
3. Fornecer vazios suficientes para o armazenamento do material de incrustação no balastro, e o movimento das partículas no balastro;
4. Facilitar as operações de manutenção e de correcção da geometria da via através da compressão e da reorganização das partículas de balastro com compactadores;
5. Permitir o escoamento imediato das águas que incidem directamente sobre a via;
6. Distribuir a tensão a partir da superfície das travessas para níveis de tensão aceitáveis para o sub-balastro e plataforma.

Assim, de modo a se verificarem as funções anteriormente enunciadas, os materiais do balastro têm de ser duros, duráveis, angulares, livres de poeira e sujidade, e ter espaços vazios relativamente grandes. Uma vez que o balastro é constituído por material granular, o seu comportamento está bem documentado na literatura relativa a este tipo de materiais [Lim (2004)].

De acordo com Tan (2002), citado por Rosete (2010), as mudanças sofridas pelo balastro, durante o serviço, resultam da:

1. Degradação mecânica ocorrida durante os trabalhos de construção e de manutenção, assim como das solicitações do tráfego;
2. Degradação química e mecânica devido aos agentes atmosféricos;
3. Intrusão de materiais externos, provenientes do derramamento do vagão e/ou da infiltração de materiais das camadas subjacentes, que provocam a contaminação do balastro. Esta contaminação origina a perda das suas características granulométricas e, consequentemente, a perda da capacidade no desempenho das suas funções (função resistente, drenagem).

O sub-balastro é a camada que separa o balastro e a plataforma. Esta camada reduz os níveis de tensão na fundação, oferecendo uma opção mais barata para o balastro, pois de outra forma, este teria de ter maior espessura. No entanto, a função mais importante do sub-balastro é evitar a interpenetração entre a plataforma e o balastro. Assim, os materiais do sub-balastro são amplamente classificados como misturas de areia e cascalho, que devem cumprir os requisitos de filtro para o balastro e para a plataforma [Lim (2004)].

Porém, o sub-balastro apresenta outras funções que não podem ser desempenhadas pelo balastro, tais como [Tan (2002), citado por Rosete (2010)]:

1. Fornecer protecção contra os efeitos de gelo/degelo na plataforma;
2. Prevenir a subida de finos provenientes da plataforma;
3. Prevenir o desgaste da plataforma pelo balastro e evitar o bombeamento de lama quando na presença de água;
4. Evitar a permutação de água entre o balastro e a plataforma e vice-versa.

A plataforma é a base para a estrutura da via. Esta camada pode ser constituída por solo natural existente no local ou por solos colocados com esse propósito. A principal função da plataforma é fornecer uma base estável para a estrutura da via. A deformabilidade e a compressão desta camada são parâmetros importantes pois determinam o aparecimento de assentamentos diferenciais, que vão influenciar a deterioração do balastro e da própria via. Assim, o assentamento excessivo da plataforma deve ser evitado [Tan (2002), citado por Rosete (2010)].

Segundo Pinto (2005), as funções que a plataforma deve desempenhar para garantir condições de segurança, comodidade e economia são as seguintes:

1. Fornecer uma superfície regular, com inclinação transversal, no sentido do escoamento das águas para o exterior da plataforma;
2. Oferecer as características de resistência necessárias para suportar as cargas que lhe são impostas;
3. Sob a acção destas cargas (cíclicas), oferecer resistência às deformações permanentes.

2.5. Desempenho dos geossintéticos nas vias-férreas

2.5.1. Introdução

Nos últimos anos, tem-se assistido a mudanças significativas quer no processo de construção como na reabilitação de vias-férreas. Tal facto deve-se à procura incessante de maiores velocidades de circulação e de maior capacidade de transporte sem descuidar a segurança das mesmas [Rosete

(2010)]. Porém, com estes acréscimos, agrava-se a deterioração das vias-férreas, sendo esta, manifestada, ao nível da infra-estrutura, por elevados assentamentos diferenciais que provocam o desnivelamento da via, pondo em causa a segurança dos seus utilizadores.

Para fazer face a esta nova realidade, começou-se a aplicar geossintéticos. Como se trata de materiais cuja existência se deve à intervenção humana, estes podem intervir de modo a conferir-lhes determinadas propriedades que dificilmente se conseguiriam com o recurso a camadas de materiais granulares mais espessas, nomeadamente a questão dos assentamentos. Deste modo, segundo Lopes (2009), a aplicação de geossintéticos em obras ferroviárias tem-se mostrado uma solução técnica e economicamente atractiva, especialmente no caso das obras de reabilitação pois permite o reaproveitamento do material de balastro.

De acordo com a mesma autora, a aplicação deste tipo de materiais em obras ferroviárias remonta aos anos 70, no entanto, em Portugal a sua aplicação é relativamente recente, e por isso há a necessidade de tirar ensinamentos de outros países, de modo a que a sua aplicação em Portugal seja igualmente eficaz.

As vantagens de aplicação de geossintéticos às vias-férreas que reúnem o maior consenso entre a literatura da especialidade são as seguintes, Lopes (2009):

- Permite o aumento dos intervalos de manutenção do material da camada de balastro;
- Controla o fenómeno de contaminação do balastro;
- Permite a redução dos deslocamentos horizontais e transversais da camada de balastro;
- Reduz os assentamentos diferenciais na camada de balastro;
- Minora o impacto ambiental, associado à exploração de pedreiras;
- Reduz os custos iniciais e de exploração;
- Maior disponibilidade de materiais e maior facilidade e rapidez de aplicação.

2.5.2. Desempenho

Na presente secção é apresentado o desempenho dos geossintéticos no que corresponde às funções para os quais estes são aplicados nas vias-férreas. A apresentação do referido desempenho tem como base ensaios realizados por diversos autores.

2.5.2.1. Separação, filtragem e drenagem

Para o cumprimento das funções de separação, filtragem e drenagem usam-se, maioritariamente, os geotêxteis. Dentro destes, é analisada a influência do tipo de estrutura face ao solo de fundação e o seu comportamento a longo prazo (colmatação dos poros).

Segundo Pinto (2005), um dos factores de grande relevância no estudo do desempenho dos geotêxteis em obras ferroviárias na função de filtragem /drenagem é o carácter dinâmico (cíclico) que as cargas apresentam. Para avaliar o comportamento dos geotêxteis no que concerne às funções debatidas nesta secção, Pinto (2005) apresenta diversas metodologias de entre as quais se destacam os estudos laboratoriais em escala real que são realizados com recurso ao equipamento “Vibrogir” que se encontra representado na Figura 2.

Trata-se de um equipamento que pretende simular os efeitos das cargas resultantes do tráfego ferroviário, por meio da aplicação de uma carga de 20 toneladas com uma frequência de 50Hz [Nancey *et al.* (2002)].

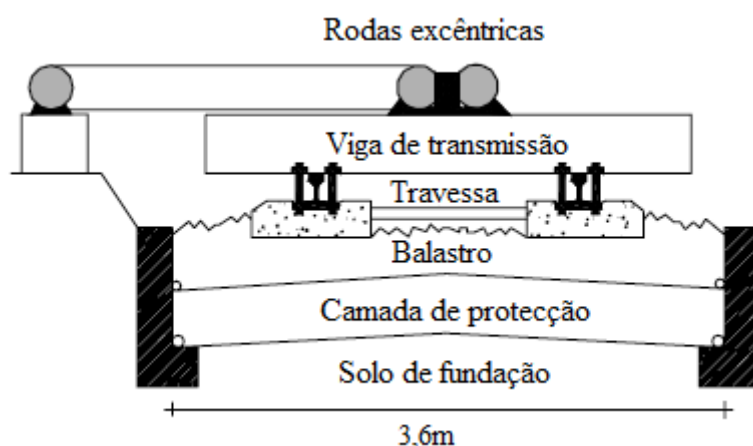


Figura 2. Esquema representativo do equipamento em escala real “Vibrogir” [adaptado de Nancey *et al.* (2002) por Pinto (2005)].

O equipamento em causa permite uma aproximação realista dos fenómenos de degradação verificados *in situ* pois permite a reprodução das condições locais de aplicação.

Faure e Imbert (1996), citados por Lopes (2009), realizaram estudos no “Vibrogir” de modo a avaliarem o desempenho de geotêxteis relativamente à função de filtragem. Nos estudos levados a cabo por aqueles autores, foram utilizados geotêxteis não tecidos, sendo um agulhado e outro termoligado (com uma massa por unidade de área variável entre 280 e 420g/m²), sendo estes colocados na interface entre a plataforma e o sub-balastro. Destes estudos, resultaram as seguintes conclusões:

- Os geotêxteis não tecidos termoligados agiram como membranas impermeáveis, consequência da colmatação das suas aberturas;
- Os geotêxteis tecidos sofreram danos severos, nomeadamente o corte de alguns filamentos, o que permitiu o bombeamento de partículas para o balastro;
- Os geotêxteis não tecidos agulhados mantiveram a sua permeabilidade independentemente do tipo de solo de fundação ensaiado.

Outros estudos foram realizados por Nancey *et al.* (2002), os quais utilizaram os mesmos geotêxteis descritos por Raymond (1999), para vias-férreas Norte Americanas, no contexto das vias-férreas Francesas e Europeias. Nos referidos estudos, aqueles autores consideraram diferentes durações de carregamento assim como a alternância de condições secas ou saturadas. De acordo com Lopes (2009), as principais conclusões deste estudo são:

- Após um carregamento de 20h, em condições saturadas, era visível uma grande quantidade de finos incrustados no geotêxtil;
- Verificou-se a ocorrência de uma ligeira diminuição da permeabilidade normal, resultado da incrustação de partículas finas, não sendo estas, suficientes para provocar a colmatação do geotêxtil;
- Em termos de transmissividade, verificou-se um decréscimo inicial mantendo-se, praticamente constante, na restante duração do carregamento.

2.5.2.2. Reforço

Segundo Brown *et al.* (2007), os custos de manutenção da camada de balastro das vias-férreas convencionais podem ser significativamente reduzidos se a taxa de assentamento diferencial desenvolvido sob acção do carregamento de tráfego for diminuída. Isto porque a qualidade de circulação e de segurança pioram com a sucessiva acumulação de assentamentos permanentes. Walls e Galbreath (1987), citados por Brown *et al.* (2007), referem que os períodos entre as operações de manutenção poderão ser aumentados em até 12 vezes se o balastro for reforçado com uma geogrelha.

Neste seguimento, Brown *et al.* (2007) descrevem uma campanha de ensaios realizada com o intuito de investigar o potencial da utilização de geogrelhas no reforço da camada de balastro, tendo em vista a redução dos assentamentos na via sob a acção de solicitações dinâmicas.

Desta campanha de ensaios surgiram as seguintes conclusões [Brown *et al.* (2007)]:

- 1) O efeito de reforço é mais pronunciado para uma plataforma mole do que uma rígida.
- 2) O tamanho da abertura da geogrelha em relação ao tamanho nominal das partículas de balastro é um parâmetro muito importante para o reforço efectivo. De acordo com Lopes (2009), a relação entre a dimensão do agregado e a abertura da grelha é importante, na medida em que, para geogrelhas cujas aberturas são de menores dimensões, quando comparadas com as do agregado, verifica-se uma redução da mobilização da resistência nas aberturas da geogrelha por impossibilidade da penetração das partículas do balastro nas aberturas da mesma. Para o balastro de 50 milímetros que foi usado, o tamanho ideal de abertura foi de 60-80mm [Brown *et al.* (2007)].

- 3) Para geogrelhas idênticas e para a mesma tensão de confinamento, a eficácia do reforço aumenta com o aumento da rigidez da geogrelha.
- 4) O perfil transversal e a rigidez à flexão das barras da geogrelha, e a resistência das juntas são parâmetros que têm influência sobre a eficácia do reforço e exigem um estudo mais aprofundado.
- 5) É improvável, que o reforço da camada de balastro proporcione um comportamento melhorado da estrutura em termos de resiliência.
- 6) A utilização de um geocompósito constituído pela associação de um geotêxtil, ligado ou não, a uma geogrelha, interfere negativamente com o mecanismo de reforço (o assentamento com reforço, é maior do que o assentamento sem reforço) pois, segundo Lopes (2009), tal situação ocorre devido à inibição, por parte do geotêxtil, da penetração das partículas de balastro nas aberturas da geogrelha.

2.6. Danificação de geossintéticos

De acordo com Pinto (2005), a aplicação de geotêxteis em obras ferroviárias é uma das mais exigentes aplicações, em termos mecânicos, a que um geotêxtil pode ser sujeito, quer seja pelo facto de este estar em contacto directo com partículas de grandes dimensões e do tipo angular, quer seja pela natureza cíclica e intensidade das cargas aplicadas, quer ainda pelo tipo de máquinas utilizadas durante a construção e manutenção da estrutura.

Na presente secção, são abordados os danos sofridos durante a instalação (DDI) e os danos resultantes do comportamento mecânico do balastro, nomeadamente a abrasão.

2.6.1. Danificação durante a instalação

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), a danificação durante a instalação de geossintéticos deriva, essencialmente, das operações de colocação e de compactação do material de aterro na vizinhança do geossintético, assim como, das operações de transporte e manuseio dos mesmos.

Shukla (2002) afirma que, em alguns casos, as tensões induzidas durante a instalação dos geossintéticos podem ser superiores às tensões a que este vai ficar submetido quando em serviço e, portanto, superiores às tensões consideradas no seu dimensionamento. Por estas razões, torna-se imprescindível o estudo deste fenómeno de modo a estabelecerem-se, eventuais, coeficientes de redução das propriedades resistentes dos geossintéticos, que traduzam, convenientemente, os efeitos da danificação durante a instalação.

Os níveis de danificação induzidos dependem de diversos factores os quais se encontram enumerados na Tabela 4.

Tabela 4. Factores que contribuem para a danificação dos geossintéticos [adaptado de Watn e Chew (2002) por Rosete (2010)].

Solo de fundação	Rigidez Resistência
Material de aterro	Dimensão das partículas (granulometria) Angulosidade
Procedimentos construtivos e equipamento de compactação/espalhamento	Tensões induzidas durante a instalação Espessura da camada de aterro Peso do equipamento de compactação Vibração provocada pela compactação
Condições climatéricas	Temperatura Água
Características dos geossintéticos	Tipo de polímero Tipo de fibras e dimensão Processo de fabrico Espessura Massa por unidade de área

2.6.1.1. Mecanismos de degradação

De acordo com Watn e Chew (2002), existem seis tipos de mecanismos de danificação, sendo eles a abrasão, a fendilhação e separação de material, o punçoamento, a rotura em tensão, o corte de fibras e o rasgamento.

Paula *et al.* (2004) realizaram uma campanha de ensaios com o intuito de determinar a influência do material de confinamento no nível de danificação induzida durante a instalação. Para tal, os referidos autores usaram diferentes materiais de confinamento, nomeadamente solos graníticos e calcários, cuja granulometria é semelhante à do material proposto pela norma EN ISO 10722-1 (1997) – o *corundum* e diferentes geossintéticos (geogrelhas extrudidas, uniaxial e biaxialmente, geogrelha tecida biaxial e geotêxteis tecidos e não tecidos). Na campanha de ensaios referida também se realizaram ensaios de desgaste Los Angeles para uma melhor caracterização do comportamento, ao desgaste, do material de confinamento.

Posteriormente, foi efectuada uma comparação entre os danos produzidos pelos materiais naturais com os produzidos pelo material sintético – *corundum*. Todos os ensaios realizados tinham como referência a resistência à tracção a curto prazo.

Deste modo, os resultados obtidos por Paula *et al.* (2004) permitiram concluir que:

- Os geossintéticos danificados com o material granítico apresentam valores de resistência residual menores do que quando danificados com o material calcário, sendo a perda de resistência mais significativa no caso dos geotêxteis;

- Quando o material confinante é natural, a petrografia influencia a danificação durante a instalação;
- A danificação é mais acentuada no caso de se usar o material sintético como material de confinamento, o que desperta para a necessidade de se efectuarem desenvolvimentos experimentais no sentido de definir o material de confinamento que melhor reproduz a danificação induzida durante a instalação.

2.6.1.2. Consequências

Segundo Christopher e Elias (1998), citados por Pinho-Lopes e Lopes (2010), as consequências da DDI em geossintéticos em aplicações de reforço são bastante importantes, pois a redução da resistência destes materiais pode comprometer o seu funcionamento, podendo levar à rotura da estrutura.

De acordo com Watn e Chew (2002), os geotêxteis, mesmo com um certo nível de degradação, não perdem a sua funcionalidade no que diz respeito às funções de filtragem e separação. Apenas, segundo Pinto (2005), perdem estas funcionalidades no caso de a danificação alterar, substancialmente, a dimensão dos poros do geossintético, ou seja, se ocorrerem cortes e/ou perfurações, alterando o seu comportamento a longo prazo.

Para aplicações em que o geossintético desempenha a função de barreira, a principal preocupação é o punçoamento a curto prazo e os cortes que podem conduzir a penetrações a longo prazo, comprometendo a estanquidade que é exigida a estes materiais [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.6.2. Abrasão

Pinho-Lopes e Lopes (2010) definem a abrasão como sendo o desgaste do geossintético imposto pelos materiais com os quais contacta directamente, nomeadamente os agregados que se encontram submetidos a cargas cíclicas, que originam pequenos movimentos friccionais, sendo as vias-férreas balastradas, um exemplo desta situação. Nestas circunstâncias, a abrasão corresponde a um dos fenómenos que pode originar a perda de resistência dos geossintéticos durante o período de vida útil do geossintético.

Nas aplicações ferroviárias, a questão da abrasão adopta proporções significativas, particularmente nos geotêxteis aplicados sob as camadas de balastro, já que as partículas do balastro (angulosas e rugosas) por acção das cargas cíclicas tendem a ter pequenos deslocamentos [Pinto (2005)]. O mesmo autor refere que quanto maior for a profundidade de colocação menor será a

danificação sofrida por abrasão, devido às menores tensões a que o material está sujeito, fruto da degradação de tensões proporcionada pela camada de balastro.

De acordo com Van Dine *et al.* (1982), citados por Pinto (2005), os processos de abrasão podem ser os especificados na Tabela 5.

Tabela 5. Processos de abrasão [adaptado de Van Dine *et al.* (1982) por Pinto (2005)].

Processo de abrasão	Descrição do fenómeno
Alinhamento	Filamentos de geotêxteis, previamente não alinhados, tendem a ficar alinhados numa direcção preferencial.
Nódulos	Filamentos individuais são parcialmente desagregados da estrutura, formando pequenos nódulos.
Corte	Filamentos individuais são primeiramente quebrados e depois cortados na direcção transversal do filamento.
Achatamento	A espessura de filamentos individuais é reduzida, enquanto a sua largura é aumentada, produzindo achatamento.
Desagregação superficial	Os filamentos superficiais são total, ou parcialmente, desagregados da estrutura que compõe o geotêxtil.
Perfuração	Filamentos individuais sofrem desgaste por vários processos, desenvolvendo-se uma abertura no geotêxtil.
Separação	Filamentos individuais separam-se da estrutura. Limitado a geotêxteis não tecidos.

3. ESTUDO LABORATORIAL DOS FENÓMENOS DE DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO E DA ABRASÃO DE GEOSSINTÉTICOS

3.1. Introdução

No presente capítulo é apresentado o estudo laboratorial, que suporta, todo o desenvolvimento do presente trabalho, assim como os resultados emanados do referido estudo.

Com este trabalho pretendem-se simular os fenómenos de danificação durante a instalação (DDI) e da abrasão de geossintéticos. Tal trabalho pressupõe a contribuição para o conhecimento da influência dos fenómenos de DDI, de abrasão e da combinação destes no comportamento mecânico de curto prazo dos geossintéticos aplicados em vias-férreas, que se traduzem na sua durabilidade face às funções para as quais foram escolhidos. O presente estudo, também contempla a determinação de coeficientes de redução para posterior utilização em dimensionamento.

Para levar a cabo o trabalho referido, recorreu-se, aos equipamentos de simulação laboratorial da DDI e da abrasão do Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). No global, tais ensaios decorreram de acordo com os procedimentos prescritos nas normas actualmente em vigor:

- EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007);
- NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998).

Para a caracterização dos efeitos dos referidos fenómenos nos geossintéticos foram realizados ensaios de tracção de acordo com as especificações patentes na segunda edição da norma EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008), emitida a 1 de Junho de 2008.

3.2. Geossintéticos utilizados

Para a avaliação dos efeitos da DDI e da abrasão, no comportamento mecânico de curto prazo dos geossintéticos aplicados em vias-férreas, utilizaram-se três materiais cuja estrutura difere entre si tal como se pode verificar na Figura 3. Esses materiais são um geotêxtil não-tecido (GTX-N) em polipropileno (PP) cuja massa por unidade de área (m.u.a.) é de 1000g/m^2 ; um geocompósito unidireccional (GCR) composto por um geotêxtil não tecido de polipropileno (PP) reforçado com filamentos de poliéster (PET); e uma geogrelha tecida (GGR-T) composta por fibras de poliéster (PET) de elevada resistência, dispostas segundo uma malha horizontal e cobertas com uma camada polimérica de protecção.

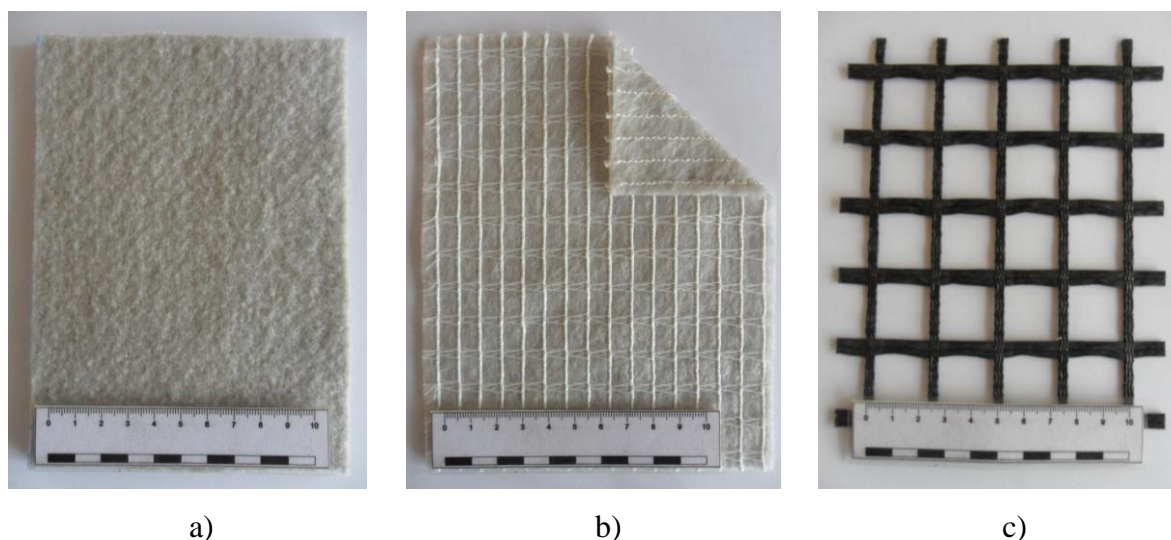


Figura 3. Materiais utilizados: a) Geotêxtil não-tecido (GTX-N); b) Geocompósito unidireccional (GCR); c) Geogrelha tecida (GGR-T).

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades mecânicas na direcção de fabrico, dos materiais usados neste estudo, nomeadamente a resistência à tracção nominal e a respectiva extensão para a força máxima, sendo estes valores da inteira responsabilidade do fabricante dos referidos materiais.

Tabela 6. Propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo na direcção de fabrico.

Geossintético	Resistência à tracção (kN/m)	Extensão para $T_{\text{máx}}$ (%)
GTX-N	55	105
GCR	55	10
GGR-T	55	10,5

3.3. Procedimentos dos ensaios

3.3.1. Ensaio de caracterização do balastro

Para a caracterização física e mecânica do balastro efectuaram-se dois ensaios: um ensaio de caracterização granulométrica e um ensaio de desgaste à abrasão de Los Angeles.

Para a realização destes ensaios laboratoriais atendeu-se aos procedimentos prescritos nas normas actualmente em vigor:

- NP EN 933-1:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Análise granulométrica. Método de peneiração.
- NP EN 1097-2:2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Métodos para a determinação da resistência à fragmentação.
- NP EN 13450:2005 – Agregados para balastro de via-férrea.

Atendendo às particularidades do ensaio de desgaste de Los Angeles para o balastro, apenas se descrevem, nesta secção, tais procedimentos. De um modo geral, o ensaio de Los Angeles segue os pressupostos especificados na norma NP EN 1097-2:2002. Porém, atendendo às características granulométricas deste material, tornou-se necessário efectuar alguns ajustes que se encontram enumerados na norma NP EN 13450:2005.

Na Tabela 7 apresentam-se as alterações introduzidas pela norma NP EN 13450:2005, no que diz respeito aos equipamentos a utilizar.

Tabela 7. Alterações introduzidas pela norma NP EN 13450:2005.

	NP EN 1097-2:2002 (genérico)	NP EN 13450:2005 (especificamente para balastro)
Peneiros a utilizar	10mm; 11,2mm e 14mm	31,5mm; 40mm e 50mm
Carga abrasiva	11 esferas de aço com uma massa total entre 4690g e 4860g	12 esferas de aço com uma massa total de (5210±90)g
Número de rotações	500 rotações	1000 rotações

A massa da amostra a enviar para o laboratório deve ter, pelo menos 15Kg de partículas cujas dimensões se encontram entre 31,5mm e 50mm.

Seguidamente, esta amostra deve ser peneirada usando-se para tal os peneiros de 31,5mm, 40mm e 50mm de abertura a fim de se obterem duas fracções granulométricas cujas dimensões se encontram enquadradas entre 31,5mm a 40mm e 40mm a 50mm. Cada uma destas fracções deve ser lavada, a fim de se removerem eventuais partículas de menor dimensão, e secada, com recurso a uma estufa, a (110±5)°C, até massa constante.

Numa outra fase, cada uma destas fracções deve ser reduzida a uma massa de (5000 ± 50) g. Posteriormente, é necessário juntar as duas fracções, de modo a obter um provete com uma massa seca total de (10000 ± 100) g.

Por último, coloca-se o provete e as esferas no equipamento de Los Angeles, devendo este funcionar com uma velocidade compreendida entre 31 r.p.m a 33 r.p.m. com uma duração correspondente a 1000 rotações. Concluído o ensaio deve-se determinar a massa retida no peneiro de 1,6mm de abertura.

Na Figura 4 apresenta-se, esquematicamente, o procedimento do ensaio de Los Angeles.

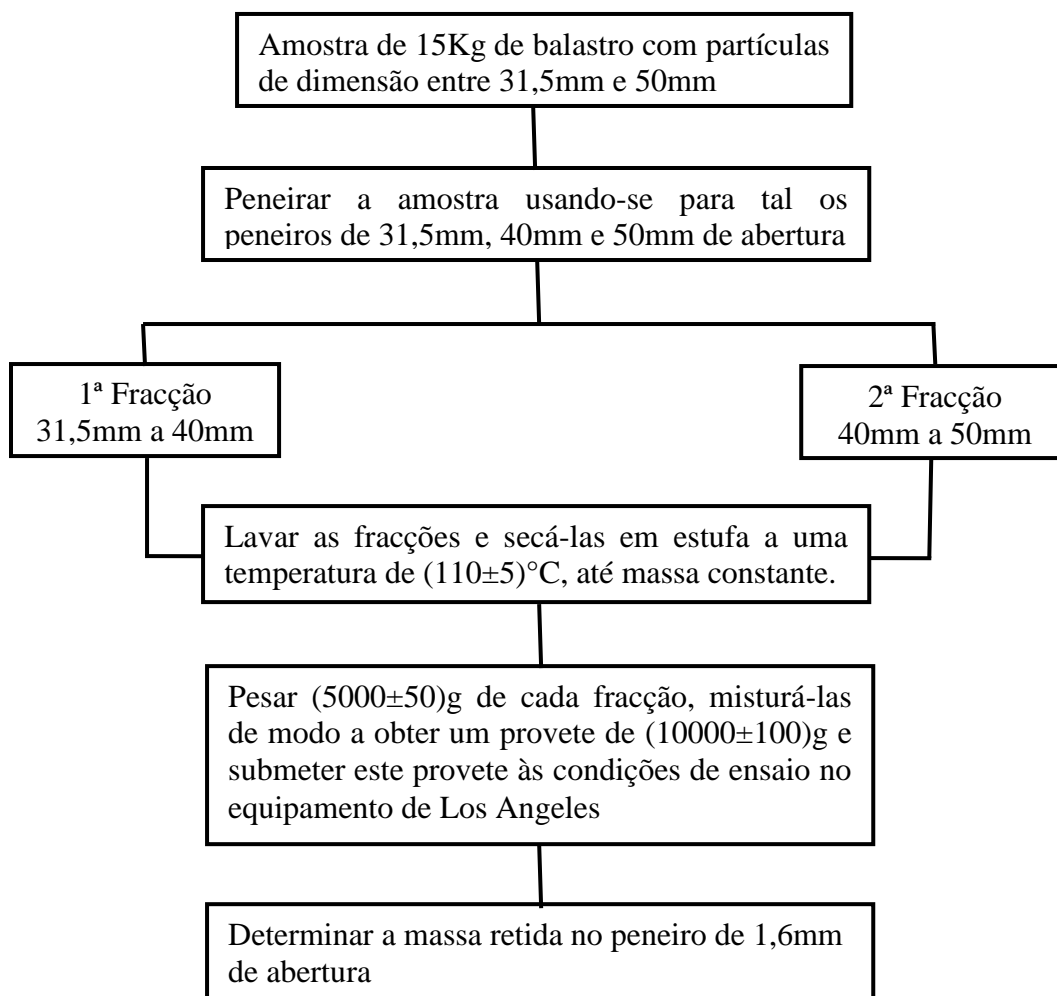


Figura 4. Procedimento do ensaio de Los Angeles para balastro (segundo NP EN 13450:2005)

É de referir que, dada a inexistência no laboratório dos peneiros de 40mm e de 1,6mm de abertura, especificados na norma NP EN 13450:2005, utilizaram-se, em sua substituição, os peneiros de 37,5mm e de 2mm de abertura.

3.3.2. Ensaio de tracção

Os procedimentos do ensaio de tracção encontram-se especificados na norma EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008), emitida a 1 de Junho de 2008.

De um modo geral, este ensaio baseia-se na fixação de um provete ao longo de toda a sua largura nas garras do equipamento de ensaio de tracção, ao qual, seguidamente, se aplica uma determinada força longitudinal, para uma velocidade de extensão constante, até que ocorra a sua rotura. As propriedades de tracção do provete são determinadas através de escalas existentes nos equipamentos sendo este operado a uma velocidade de extensão fixa de $(20 \pm 5) \%$ por minuto para todos os geotêxteis e produtos relacionados.

O ensaio base, para todos os tipos de geossintéticos, é realizado com provetes que apresentam 200mm de largura e 100mm de comprimento entre garras. Quando é requerida informação sobre a extensão, são efectuadas medições da deformação utilizando um extensómetro que segue o movimento de dois pontos de referência definidos no provete. Estes pontos de referência estão situados no eixo de simetria do provete, paralelo à carga aplicada, e distam, entre si, de 60mm (30mm para cada lado do centro de simetria do provete). Para as geogrelhas esta distância pode ser adaptada de forma a incluir pelo menos uma fiada de nós.

Para que se obtenha alguma representatividade, a referida norma estipula que devem ser preparados, no mínimo, 5 provetes, para cada direcção, do geossintético a ensaiar. Porém, a preparação dos provetes depende da estrutura do geossintético devendo estes dispor de uma largura de 200 ± 1 mm e comprimento suficiente de modo a que a distância entre as garras seja de 100mm.

Para as geogrelhas, os provetes devem ter pelo menos 200mm de largura e comprimento suficiente para assegurar 100mm entre garras e deve conter, pelo menos, uma fiada de nós ou elementos transversais entre garras. Para os produtos cuja distância entre elementos na direcção de ensaio é inferior a 75mm, os provetes devem conter pelo menos 5 elementos de tracção completos na direcção da largura, se a distância entre elementos na direcção de ensaio for igual ou superior a 75mm, os provetes devem conter no mínimo dois elementos de tracção completos na direcção da largura.

No que concerne aos pontos de referência para a medição da extensão nos provetes das geogrelhas, a norma refere que estes devem ser marcados segundo o elemento central que se encontra à tracção e devem estar separados pelo menos 60mm, devendo esta distância englobar pelo menos um nó ou elemento transversal. Quando necessário, os dois pontos de referência poderão ser separados por mais do que uma fiada de nós ou elementos transversais, para obter uma separação mínima de 60mm, devendo ser mantido o requisito de marcar os pontos na barra central. Se

possível, de modo a definir-se com alguma exactidão dois eixos de simetria (um em cada direcção), pode-se optar por cortar os provetes de modo a que estes contenham um número ímpar de elementos em ambas as direcções, respeitando as dimensões estabelecidas na norma.

Uma vez preparados os provetes, estes devem ser colocados centralmente nas garras. É de salientar que, tanto nos ensaios efectuados na direcção de fabrico como nos efectuados na direcção transversal, o comprimento do provete fica paralelo à direcção de aplicação da força.

Seguidamente, e antes de se iniciar o ensaio, deve-se ajustar a distância entre as garras para obter um comprimento de provete de $100\text{mm} \pm 3\text{mm}$.

Após a inserção dos provetes nas garras, a montagem do extensómetro e o ajuste do equipamento, pode ser iniciado o ensaio, aplicando no provete uma força de tracção crescente até que ocorra a rotura do mesmo. Assim que atingida a rotura do provete, o equipamento deve ser parado, e a força de tracção máxima deve ser registada (com uma precisão de 0,2 % de toda a escala de leitura), assim como a extensão correspondente (com uma precisão até à primeira casa decimal).

De acordo com a norma EN ISO 10319:2008, a decisão de rejeitar os resultados de uma rotura deve ser baseada nas observações do provete durante o ensaio, na variabilidade inerente ao geossintético e na ausência ou não de deslizamento dos pontos de referência utilizados na medição da extensão. Na ausência de outro critério para rejeitar uma rotura nas garras, qualquer rotura que ocorra até 5mm das garras, que resulte num valor abaixo de 50 % dos valores médios de todas as outras roturas, deve ser rejeitada.

Nos ensaios do geotêxtil e do geocompósito a marcação dos pontos de referência para a medição da extensão, processou-se sem qualquer incidente respeitando o especificado na norma EN ISO 10319:2008. Porém, no caso da geogrelha, devido à configuração e ao modo de fixação dos alvos, usados na medição da extensão, e das dimensões das aberturas da geogrelha (inferior a 75mm), foi necessário efectuar alguns ajustes na marcação dos pontos de referência. Deste modo, a separação entre alvos não foi de 60mm, mas sim cerca de 80mm, compreendendo, deste modo, três fiadas de nós.

Relativamente à medição da extensão esta foi efectuada com recurso a um vídeo-extensómetro, que mede a distância entre os pontos de referência enunciados anteriormente.

A escolha das garras utilizadas para a realização dos ensaios, resultou da consulta de alguns trabalhos efectuados anteriormente conjuntamente com a realização de alguns ensaios de teste a fim de averiguar a sua eficácia.

Deste modo, no caso do geotêxtil, foram realizados ensaios experimentais em provetes intactos com as garras de cunha com face rugosa (Figura 5b), com e sem a utilização de colagens das extremidades do provete e com as garras de cunha com face aderente em borracha (Figura 5c).

Na primeira fase do ensaio com as garras de face rugosa, para evitar escorregamentos, os provetes foram cortados com um comprimento de 360mm, para depois se realizar a colagem das extremidades. Durante a fixação destes provetes nas garras, verificou-se, que devido à elevada espessura do geotêxtil, a fixação dos provetes nas garras era deficiente, facto este que, conjuntamente com a elevada resistência à tracção exibida pelo geotêxtil, provocou a descolagem do geotêxtil durante o ensaio, originando escorregamentos significativos (Figura 6).

Seguidamente, de modo a contornar a questão relativa à má fixação dos provetes nas garras, devido à elevada espessura, realizaram-se ensaios, nos quais não se efectuaram colagens, tendo os provetes um comprimento de 200mm (Figura 8a). Mais uma vez, devido à elevada resistência à tracção exibida pelo geotêxtil ocorreram escorregamentos (Figura 8b).

Dado o insucesso destas duas tentativas, optou-se pela realização de ensaios usando as garras de face aderente em borracha e sem colagens. Nestes ensaios, a base aderente permitiu evitar o deslizamento do provete, e por isso optou-se por usar estas garras nos restantes ensaios (Figura 8d).

Nos ensaios de tracção com o geocompósito de reforço GCR, teve-se em consideração a metodologia utilizada por Rosete (2010), a qual utilizou as garras de cunha com face rugosa (Figura 5b). Para evitar o escorregamento dos filamentos de poliéster das garras, os provetes foram cortados com um comprimento de 340mm (Figura 10b), para depois se realizar a colagem das extremidades do provete. Antes da dobragem das zonas a colar foram introduzidos dois varões de 6mm de diâmetro, um em cada uma das extremidades [Rosete (2010)]. Na Figura 9 é apresentado o esquema de preparação dos provetes do GCR e na Figura 10 apresentam-se as dimensões dos provetes de geotêxtil e do geocompósito para o ensaio de tracção.

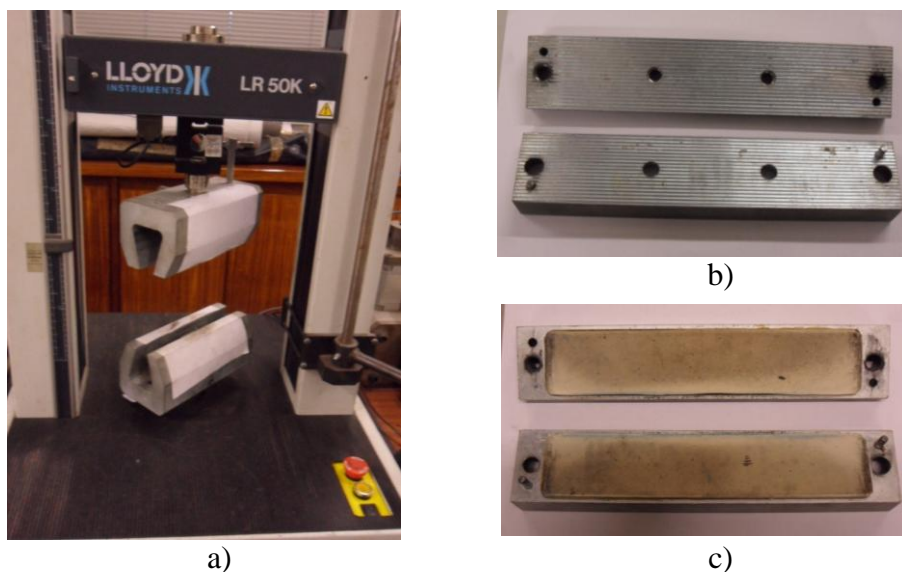


Figura 5. Garras utilizadas nos ensaios de tracção do GTX e do GCR: a) suporte das garras de cunha; b) garras de face rugosa; c) garras de face lisa em borracha.

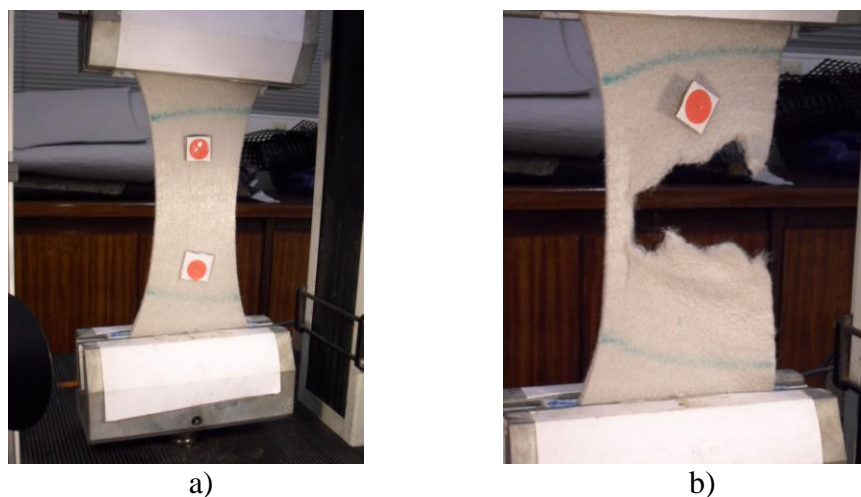


Figura 6. Ensaio de tracção de um provete do geotêxtil com as garras de face rugosa e com colagens: a) provete antes da rotura; b) provete após rotura.



Figura 7. Ensaio de tracção de um provete de geotêxtil, pormenor da descolagem e escorregamento do provete.

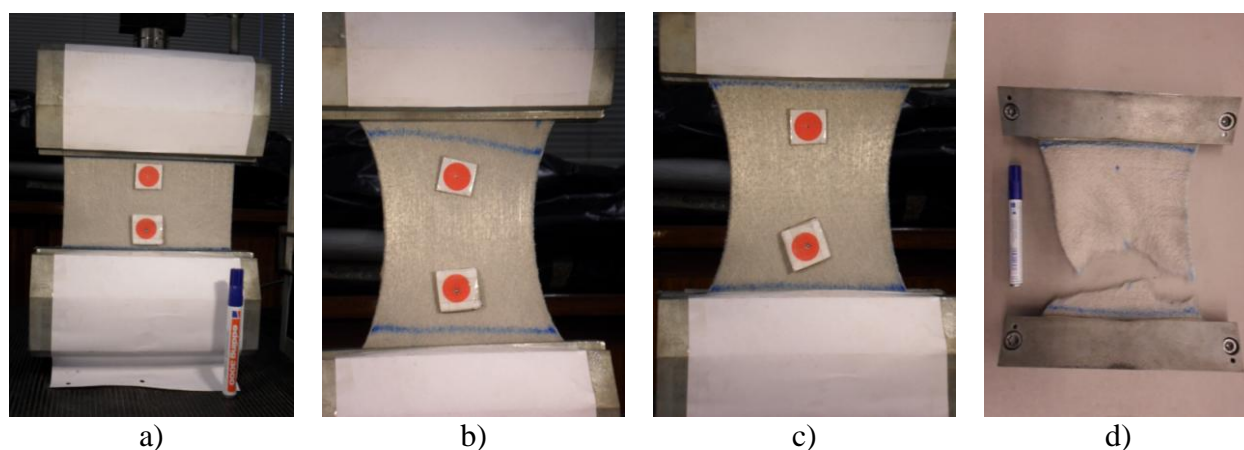


Figura 8. Ensaio de tracção de um provete do geotêxtil com as garras de face rugosa: a) provete antes do ensaio; b) provete após interrupção do ensaio e com as garras de face lisa; c) provete durante o ensaio; d) provete após a rotura.

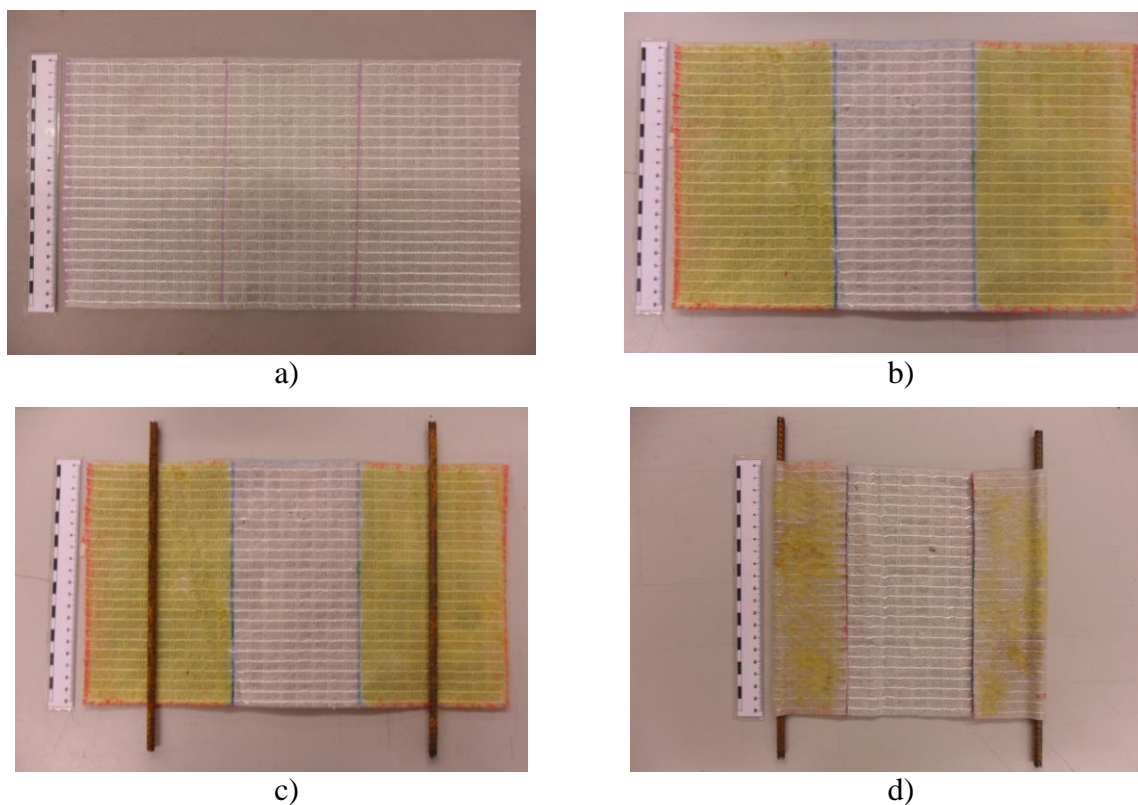


Figura 9. Preparação dos provetes de GCR: a) provete após corte; b) aplicação da cola nas extremidades; c) colocação dos varões de 6mm; d) provete após colagem.

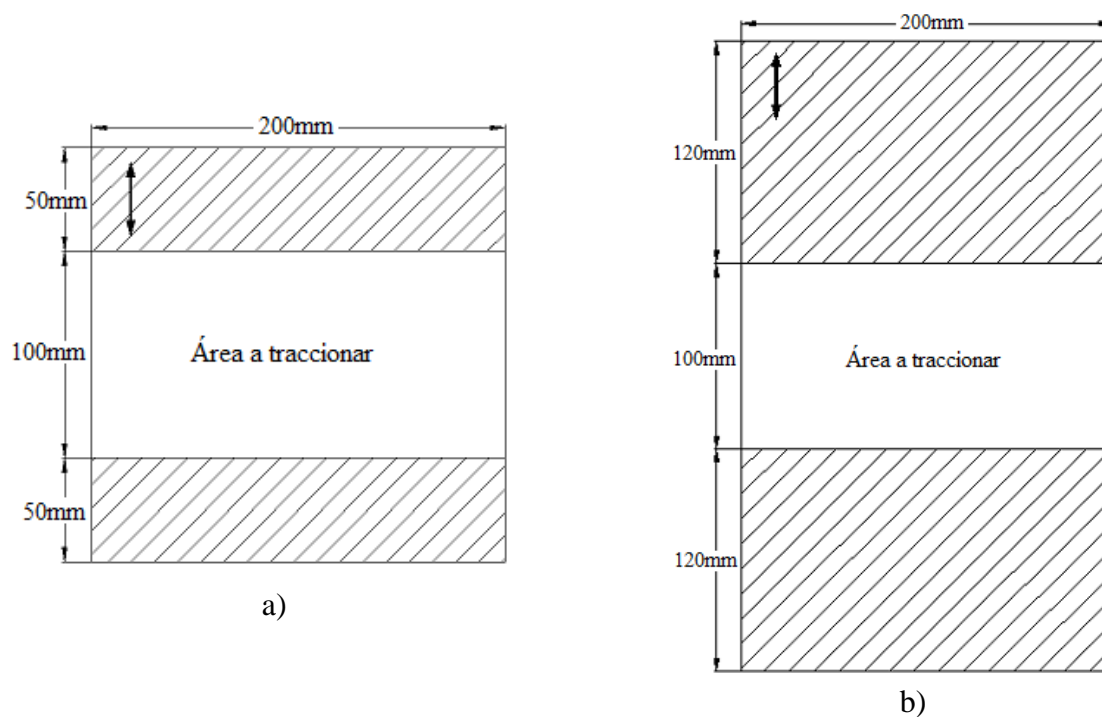


Figura 10. Dimensão dos provetes para o ensaio de tracção: a) do geotêxtil; b) do geocompósito.

Para a geogrelha foram realizados ensaios experimentais em provetes intactos, com as garras de cunha com face rugosa (Figura 5b) e com as garras cilíndricas (Figura 11). Nos ensaios experimentais realizados com as garras de face rugosa, optou-se por efectuar a colagem das extremidades do provete com a inserção de um varão de 6mm de diâmetro, de modo a evitar escorregamentos. Porém, verificou-se a existência de algum descolamento das extremidades do provete, o que poderá ter influenciado os valores obtidos para a força de tracção máxima (Figura 12).

Relativamente aos ensaios com as garras cilíndricas, verificou-se que estes apresentavam ligeiras deformações ao nível das pegas porém, optou-se por escolher estas garras para a realização dos restantes ensaios, já que a força máxima obtida aproximava-se, ainda que ligeiramente inferior, do valor fornecido pelo fabricante (Figura 13).

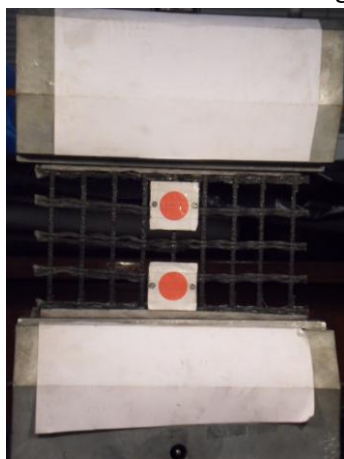


a)

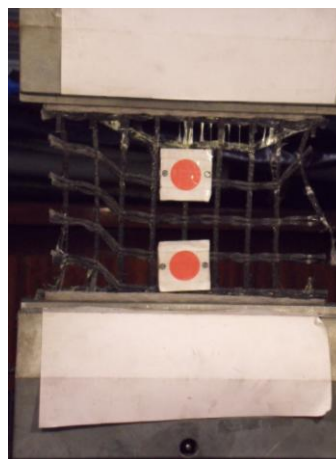


b)

Figura 11. Garras cilíndricas utilizadas nos ensaios de tracção da geogrelha: a) aspecto geral; b) em pormenor.



a)



b)

Figura 12. Ensaio de tracção de um provete da geogrelha com as garras de face rugosa e com colagem: a) provete antes do ensaio; b) provete após interrupção do ensaio.

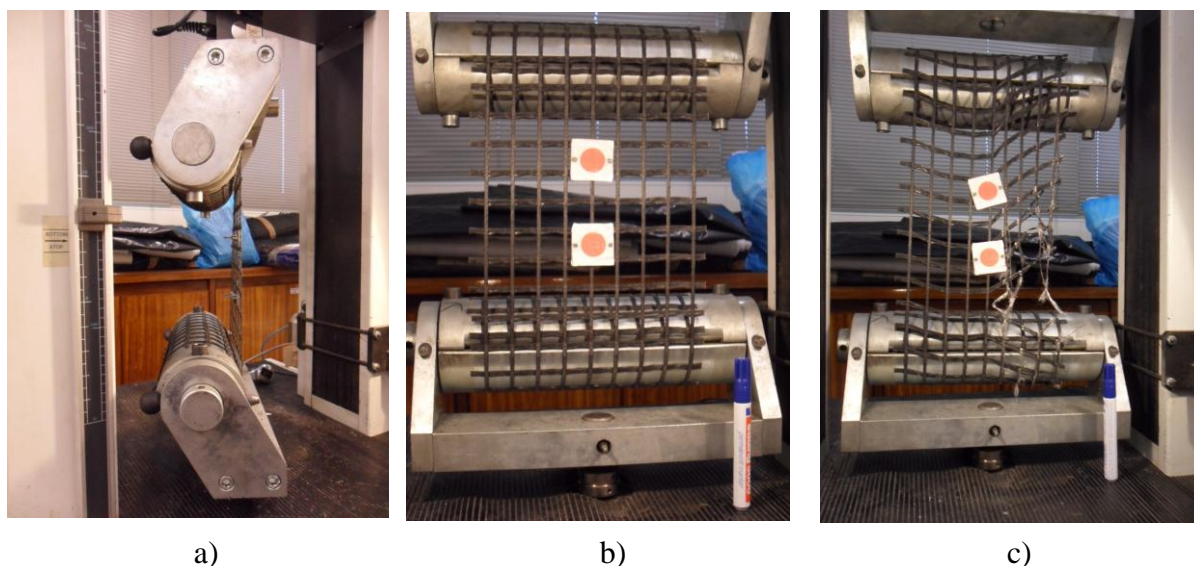


Figura 13. Ensaio de tracção de um provete da geogrelha com as garras cilíndricas: a) posicionamento do provete relativamente às pegas; b) provete antes do ensaio; c) provete após rotura.

3.3.3. Ensaio de danificação durante a instalação - DDI

Os procedimentos para a simulação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos encontram-se descritos na norma EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007).

Na Figura 14 apresenta-se, o aspecto geral do equipamento utilizado para a simulação laboratorial da danificação de geossintéticos, sendo este equipamento constituído, fundamentalmente, por:

- Mecanismo de aplicação da carga – pode ser controlado de modo a produzir uma pressão sinusoidal, na placa de carregamento, entre os $900 \pm 10 \text{ kPa}$ e $5 \pm 0,5 \text{ kPa}$, a uma frequência de 1Hz;
- Caixa de danificação – trata-se de uma caixa metálica e rígida, que apresenta dimensões internas de $300 \times 300 \text{ mm}^2$ e contém o material granular e o geossintético. A caixa é composta por duas partes, com uma altura de 75mm cada, que são fixadas por encaixe. A caixa deve ser colocada sobre uma base rígida cuja deformação seja inferior a 1mm, quando a carga de ensaio é aplicada directamente na base, ou deve ser fixada rigidamente ao pistão hidráulico da máquina de compressão;
- Placa de carregamento – é realizada em aço, deve ter as dimensões de $100 \times 200 \text{ mm}^2$ e uma rigidez adequada para que possa transmitir as cargas ao agregado, sem sofrer flexão.

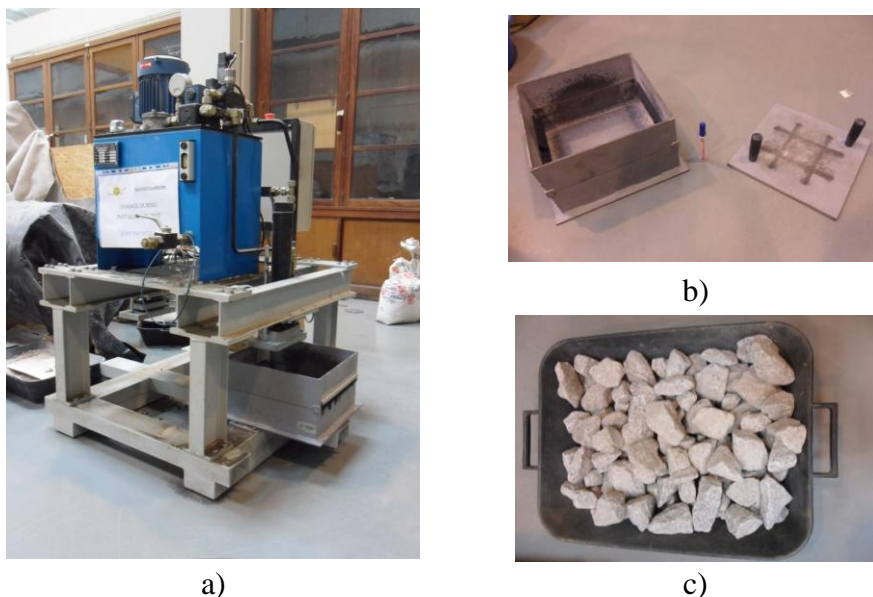


Figura 14. Equipamento de simulação da DDI: a) equipamento utilizado; b) caixa de danificação e placa de compactação; c) material granular utilizado.

De acordo com a referida norma, antes de iniciar o ensaio devem ser preparados 5 provetes com 1,0m de comprimento e 0,5m de largura, devendo cada um destes, posteriormente ser cortado em dois provetes com 1,0m de comprimento e 0,25m de largura (um para ser usado no ensaio de danificação e o outro para ser utilizado no ensaio de referência). Os provetes de referência não são intactos, mas após lhe ser aplicada, directamente, uma pressão de 500kPa durante 60s.

Todos os provetes devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas condições definidas na norma ISO 554: Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications ($65 \pm 5\%$ de humidade relativa e $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatura).

O procedimento deste ensaio, de acordo com a norma, consiste em encher a caixa inferior com um agregado sintético (*corundum*), segundo duas camadas de igual altura, perfazendo uma altura total de 75mm. Cada uma dessas camadas é compactada com uma placa metálica rígida colocada sobre toda a área da caixa, aplicando-lhe uma tensão de $200 \pm 2\text{kPa}$ durante 60 segundos.

Esta norma especifica que o material granular a utilizar seja um agregado sintético de óxido de alumínio normalizado, tendo partículas de dimensões entre os 5mm e os 10mm. O mesmo material deve ser peneirado, por via húmida, com o peneiro de 5mm, após 3 utilizações, e rejeitado ao fim de 20 utilizações.

Após enchimento e compactação da caixa inferior, é colocado o provete do geossintético sobre a camada de balastro, alinhando o centro do provete com o centro da caixa. A caixa superior é encaixada sobre a caixa inferior, verificando-se que o provete do geossintético fica sem rugas e sem tensão. Esta caixa foi cheia com balastro solto até à altura de 75mm. O enchimento desta última caixa processou-se com algum cuidado especial, no sentido de se obter uma zona central (zona da

aplicação da carga) menos rígida de modo a permitir algum rearranjo das partículas e o subsequente ajustamento da placa de carregamento a esta camada para posterior aplicação da carga cíclica. Este cuidado surgiu após a verificação de que em alguns ensaios, quando o núcleo central era rígido (essencialmente constituído por partículas grosseiras), o actuador hidráulico ao entrar em contacto com a referida camada exercia apenas uma carga estática.

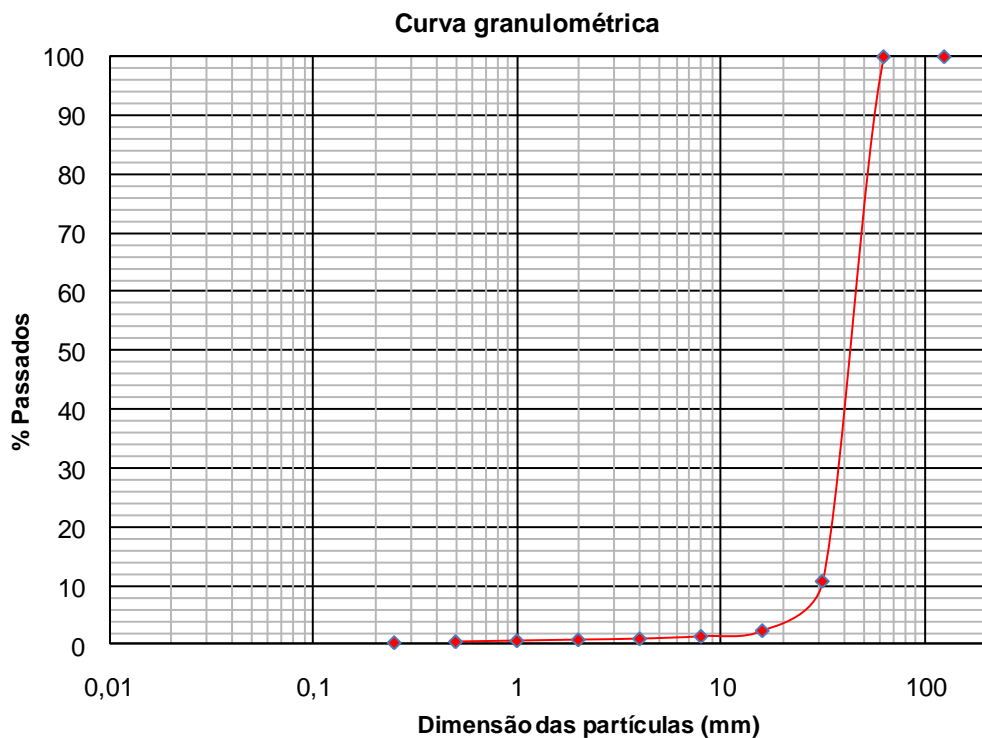
Seguidamente, o conjunto das duas caixas é colocado em posição central sob a placa de carregamento sendo este efectuado ao longo de 200 ciclos, a uma frequência de 1Hz, com uma carga cíclica a variar entre os $5\pm 5\text{kPa}$ e os $500\pm 10\text{kPa}$. Concluída a aplicação dos 200 ciclos de carga, o material granular e o provete são cuidadosamente removidos da caixa, sem que o provete sofra qualquer tipo de danificação adicional. Seguidamente efectua-se uma observação visual da danificação existente no provete e o ensaio de referência do mesmo, para avaliar as alterações sofridas nas propriedades de referência. Este procedimento deve ser repetido para todos os provetes da amostra em análise.

No entanto, na parte experimental deste trabalho foi utilizado um material de confinamento com características distintas do material especificado pela norma EN ISO 10722:2007. Assim sendo, foi utilizado um material granular, do tipo angular e de origem granítica, com dimensões a variar entre os 16mm e os 63mm (Figura 15) e com uma resistência à abrasão obtida no ensaio de Los Angeles de 83,2% (coeficiente de Los Angeles de 16,8%). Foi utilizado este material, convencionalmente utilizado no balastro das vias-férreas, para tentar reproduzir, o mais realisticamente possível, as condições a que os geossintéticos ficam sujeitos quando aplicados na interface sub-balastro/balastro nas estruturas ferroviárias. Dadas as características deste material, em particular a sua angulosidade e a quebra de partículas verificada, optou-se pela peneiração do material no peneiro de 16mm após 3 utilizações e rejeição do material após 20 utilizações à semelhança do que a norma especifica para o agregado sintético. É de salientar que, devido à morosidade de tal processo e à indisponibilidade de equipamento, nomeadamente a estufa, para a realização do mesmo, optou-se pela peneiração tradicional (via seca).

Relativamente ao valor da carga cíclica a aplicar optou-se por fazer variar este valor entre os $5\pm 5\text{kPa}$ e os $900\pm 10\text{kPa}$ de modo a permitir a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos desenvolvidos no mesmo âmbito tendo-se sempre presente que os resultados obtidos com esta carga são mais conservativos do que os obtidos com a carga especificada na norma.

Por outro lado, no presente trabalho, tendo em conta a área necessária para realizar os ensaios de referência (ensaio de tracção), as dimensões adoptadas para os provetes foram: 500mm de comprimento e 250mm de largura.

Na Figura 16 apresenta-se, esquematicamente, o tipo de provetes utilizados no processo de simulação da danificação durante a instalação.



Silte	Areia			Seixo			Calhau
	Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso	

Figura 15. Curva granulométrica do solo utilizado no ensaio laboratorial de danificação.

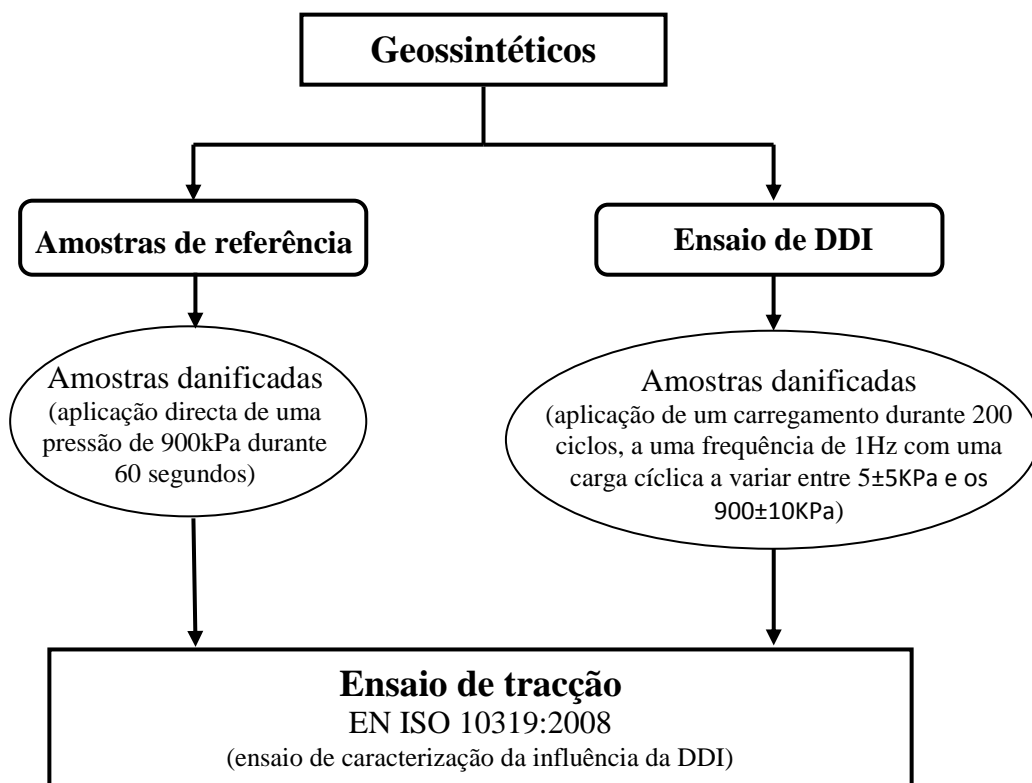


Figura 16. Metodologia do ensaio de DDI

3.3.4. Ensaio de abrasão

Os procedimentos do ensaio laboratorial de abrasão encontram-se descritos na norma NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998). Este ensaio pretende simular a abrasão que os geossintéticos sofrem quando o balastro, com que contactam directamente, sofre deslocamentos provocados pela aplicação das cargas provenientes do tráfego ferroviário.

O presente ensaio consiste na colocação de um provete numa plataforma fixa onde este será friccionado por um abrasivo com características de superfície P100. O abrasivo é movido ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, sob condições controladas de pressão e acção abrasiva. A resistência à abrasão é expressa como a percentagem da perda das propriedades de tracção do provete. Deste modo, na Figura 17 apresenta-se o equipamento utilizado para a simulação da abrasão dos geossintéticos.



Figura 17. Equipamento de simulação da abrasão: a) equipamento utilizado; b) película abrasiva P100.

Os provetes dos materiais a ensaiar devem ser cortados com as dimensões de $430 \times 200 \text{ mm}^2$, tal como preconizado na norma EN 963:1995 - Geotextiles and geotextile-related products. Sampling and preparation of test specimens, com excepção da geogrelha tecida que devido à metodologia usada no ensaio de referência (ensaio de tracção), necessita de um maior comprimento, e as películas abrasivas com as dimensões de $220 \times 385 \text{ mm}^2$. É de referir que a maior dimensão dos provetes corresponde à direcção na qual se pretende simular a abrasão.

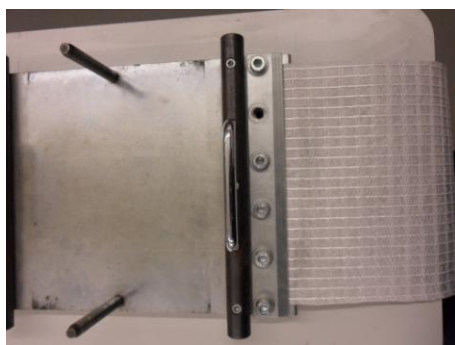
Na placa deslizante (placa inferior) coloca-se a película entre as garras de fixação, de modo a que esta não apresente rugas e orientada no sentido do desenvolvimento do equipamento, conforme mostra a Figura 18, e apertam-se os parafusos de cada uma das garras até que a película fique firme.



Figura 18. Fixação da película abrasiva à placa inferior do equipamento.

Na placa estacionária (placa superior) do equipamento, coloca-se uma das extremidades do provete alinhada sob a garra da placa, do lado que não possui esticador, e apertam-se os parafusos dessa mesma garra, conforme se mostra na Figura 19. Seguidamente, alinha-se o provete com o desenvolvimento da placa, fixando-o na outra extremidade sob a garra, Figura 20a. Até esta fase, o esticador não deve ser utilizado, devendo somente iniciar-se a sua utilização após colocação e fixação do provete às duas garras da placa superior.

Para ajustar o provete à placa, devem ser apertados alternadamente os parafusos do esticador conforme se mostra na Figura 21b. Este esticador vai eliminar eventuais folgas entre o provete e a placa e evita que, durante o ensaio, a placa superior se desloque relativamente ao provete, enquanto este adere à película abrasiva.



a)

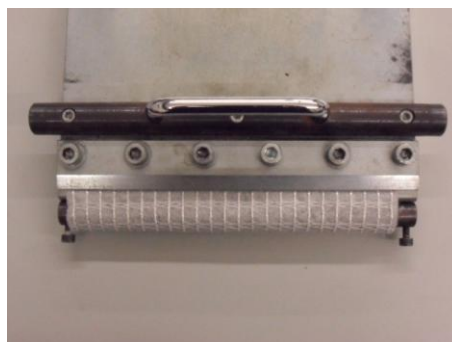


b)

Figura 19. Colocação do provete na placa superior do equipamento de simulação da abrasão, na extremidade que não possui esticador: a) fixação do provete nas garras; b) provete alinhado sob a placa superior.

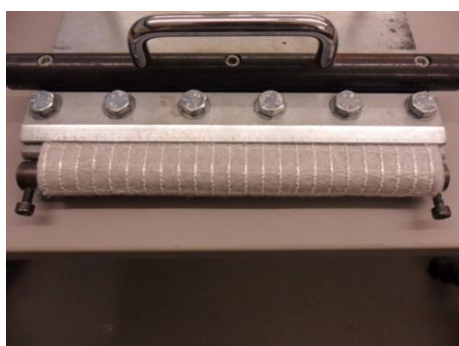


a)



b)

Figura 20. Colocação do provete na placa superior do equipamento de simulação da abrasão, na extremidade que possui esticador: a) alinhamento do provete; b) fixação do provete na garra.



a)



b)

Figura 21. Ajuste do provete à placa superior através do esticador: a) provete antes do ajuste; b) provete após ajuste.

De seguida, coloca-se a placa superior nos apoios verticais do equipamento, baixando-a até que esta fique alinhada com a placa inferior onde foi colocado o abrasivo. Carrega-se a placa superior com os três níveis de massa de modo a perfazer uma massa total de 6kg.

O equipamento trabalha a uma frequência máxima de 90 ciclos por minuto e deve funcionar com essa frequência durante 750 ciclos (cada ciclo corresponde a uma passagem dupla).

Uma vez terminado o ensaio, retira-se cuidadosamente o provete do equipamento, sem que se provoque qualquer tipo de danificação adicional. Na outra face do provete, oposta à que foi submetida à abrasão, marca-se a forma do provete a ensaiar no ensaio de controlo (ensaio de tracção) e corta-se pela marcação. Este ensaio é utilizado para determinar a perda da resistência à tracção sofrida devido à abrasão.

No entanto, no presente trabalho houve a necessidade de se efectuar alguns ajustes de modo a simular eficazmente o fenómeno de abrasão nos materiais ensaiados, nomeadamente na amostra de geotêxtil.

Sendo assim, para a amostra de geotêxtil, adoptou-se o procedimento descrito por Rosete (2010) em que, para evitar o deslocamento relativo entre o provete e a placa superior, interpôs-se, entre a placa e o provete, uma película abrasiva com características de superfície P24 (Figura 22a).

Na extremidade, sem esticador, foram fixados o abrasivo P24 e o provete, alinhados sob a garra, e apertados com os parafusos. Do lado oposto, apenas se fixou o abrasivo sob a garra e apertou-se os parafusos do esticador, alternadamente, para eliminar as folgas existentes entre o abrasivo e a placa superior. Seguidamente, o provete de geotêxtil é alinhado e fixado, por contacto entre os dois materiais, ao abrasivo, ficando deste modo o provete solto na extremidade que possui o esticador tal como se pode verificar na Figura 22d.

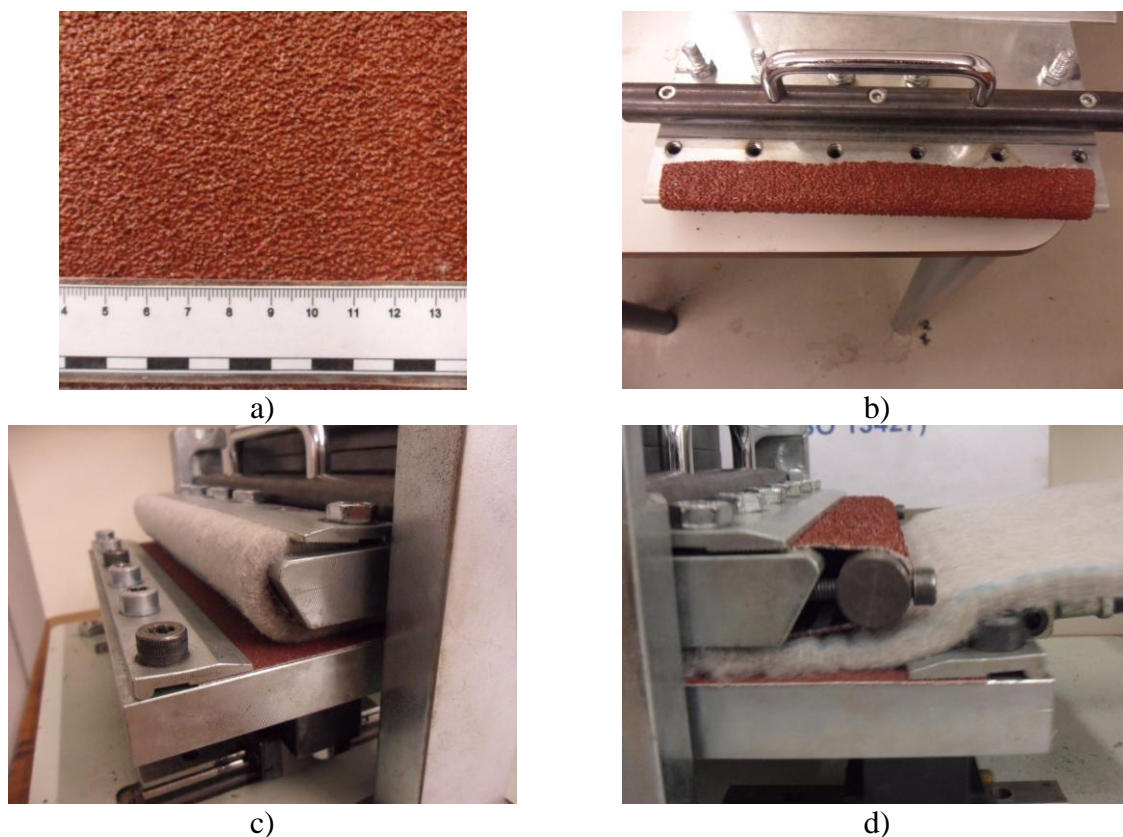


Figura 22. Montagem do provete de geotêxtil no ensaio laboratorial de abrasão, após fixação à placa superior com abrasivo P24: a) película abrasiva P24; b) alinhamento do abrasivo P24 na extremidade sem esticador; c) provete e abrasivo P24 fixos sob a garra na extremidade sem esticador; d) abrasivo P24 fixo na extremidade que possui esticador e geotêxtil solto.

Assim sendo, os ajustes enunciados anteriormente permitiram simular adequadamente a abrasão sem que existissem deslocamentos relativos entre o provete de geotêxtil (GTX) e a placa superior. Além disso, verificou-se que na face do GTX em contacto com o abrasivo de fixação (P24) não havia alterações visíveis do material.

Relativamente às amostras de geocompósito (GCR) e da geogrelha tecida (GGR), a metodologia apresentada na norma NP EN ISO 13427:2006 foi suficiente para simular a abrasão. Porém, no caso do geocompósito de modo a evitar o escorregamento dos cordões que o constituem houve a necessidade de o dobrar junto das extremidades, garantindo-se deste modo o aprisionamento dos mesmos. É de referir que este ensaio decorreu com os filamentos de PET directamente em contacto com a película abrasiva. No que concerne à geogrelha, não houve a necessidade de se efectuarem ajustes, apenas se teve o cuidado de centrar os provetes, uma vez que estes apresentavam um comprimento maior do que o estabelecido na norma EN 963:1995 ficando, porém, as extremidades soltas tal como se pode verificar na Figura 23b. É de referir que a fixação dos provetes da geogrelha (Figura 23a) induziu alguma danificação ao nível dos filamentos longitudinais nomeadamente o esmagamento desses mesmos filamentos. Porém, dado o carácter agressivo dos danos induzidos, a rotura dos provetes, aquando da sua submissão ao ensaio de tracção, ocorreu na zona entre as garras.

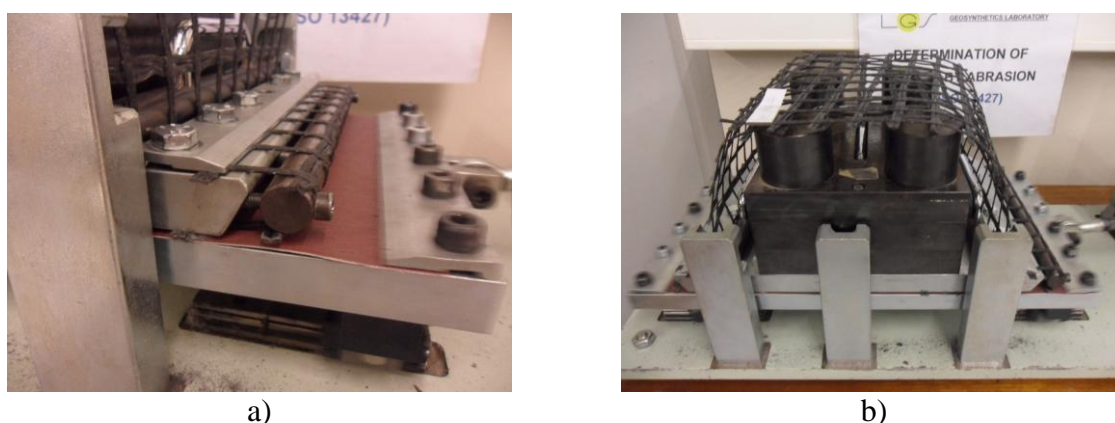


Figura 23. Esquema de ensaio para a simulação da abrasão na geogrelha: a) fixação do provete à placa estacionária; b) aspecto final após colocação dos pesos sobre a placa.

Na Figura 24 apresenta-se, esquematicamente, o tipo de provetes utilizados no processo de simulação da abrasão e na Figura 25 apresenta-se um esquema representativo do plano de ensaios utilizado no presente trabalho. O mesmo esquema também apresenta o tipo de amostras preparadas, as normas de ensaio e as alterações efectuadas a estes documentos normativos.

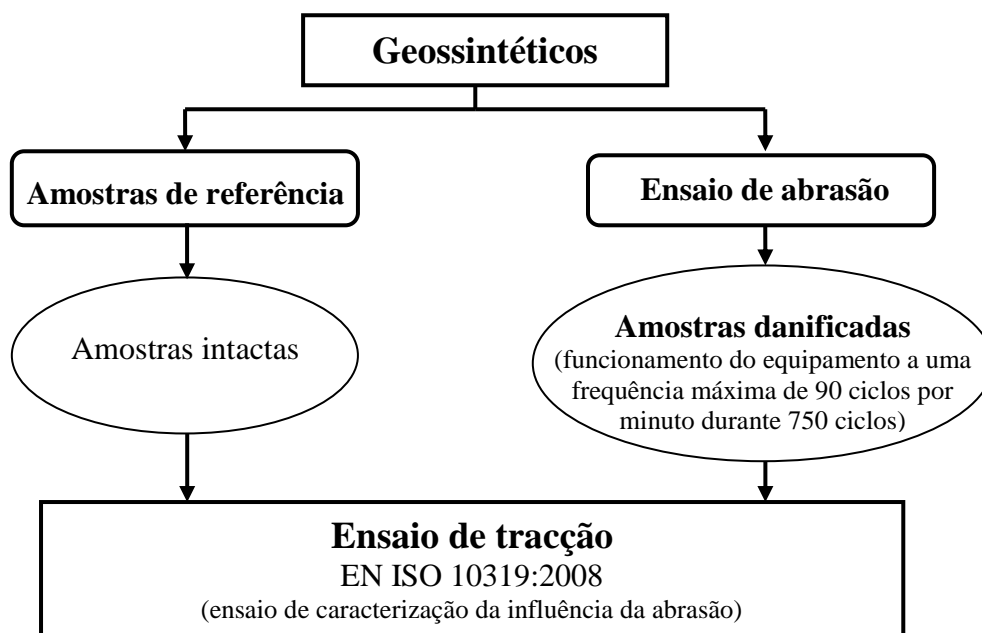


Figura 24. Metodologia do ensaio de Abrasão.

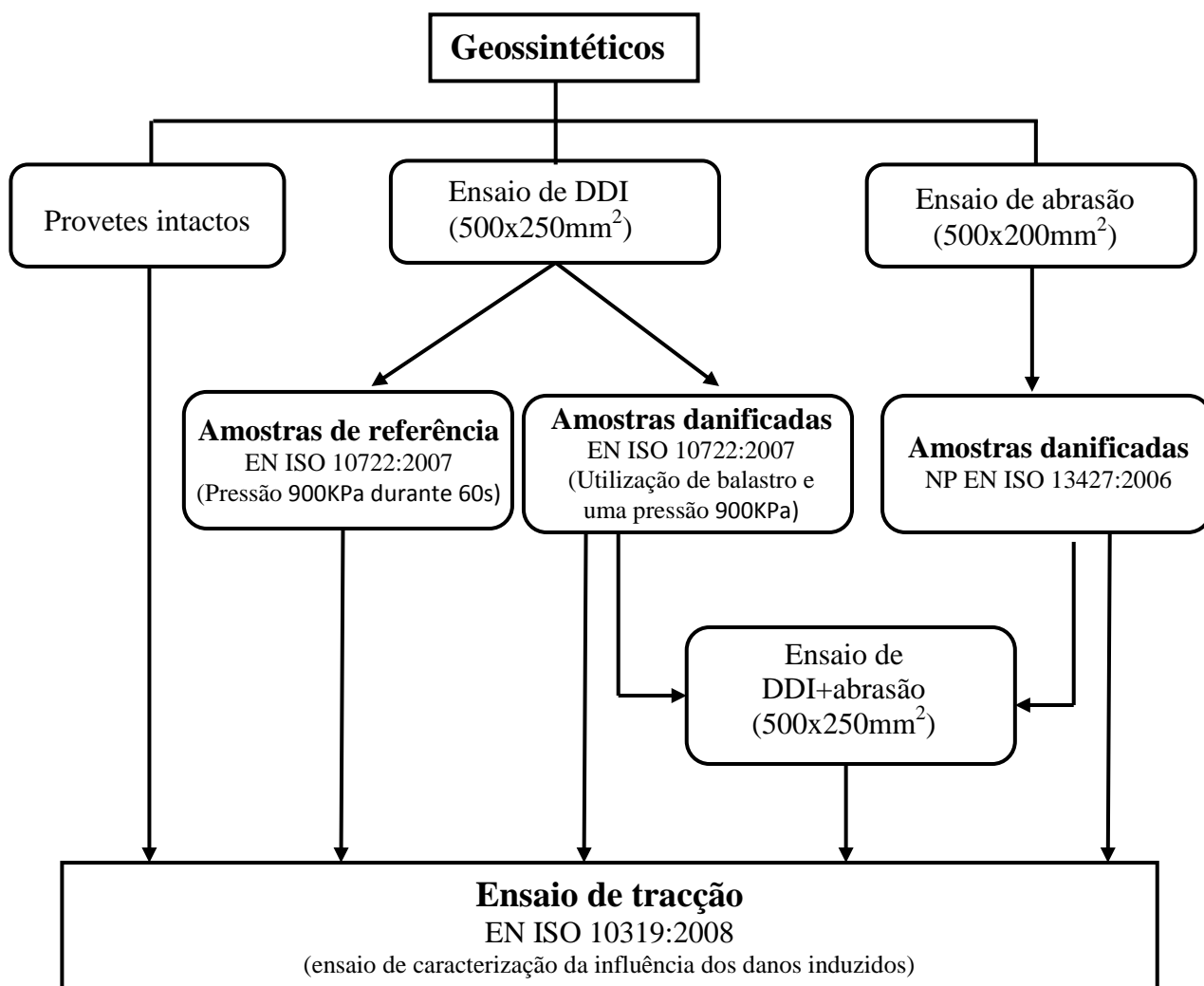


Figura 25. Plano de ensaios.

3.4. Apresentação dos resultados

Na presente secção são apresentados os resultados dos ensaios de tracção efectuados aos geossintéticos em análise. Esses resultados apenas se referem às propriedades mecânicas de tracção na direcção de fabrico. A sua discussão e comparação ficam reservadas para a secção seguinte.

Deste modo, são apresentados os resultados dos ensaios de tracção: em provetes intactos; após ensaios de DDI de referência; após ensaios de simulação de abrasão; após indução de DDI; e após a combinação (sobreposição) destes dois últimos. Tais resultados são apresentados para cada um dos geossintéticos analisados no âmbito do presente trabalho.

Esses resultados incluem os valores obtidos nos ensaios de tracção, nomeadamente a resistência à tracção máxima (T_{max}) e a correspondente extensão na rotura (ϵ_{max}), e os respectivos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação (C.V.). Com os valores obtidos traçou-se a curva força-extensão de cada provete efectuando-se a aproximação a uma curva polinomial de grau 5, a partir da qual foi determinada a robustez (U), ou seja, a energia dispendida até à rotura (Figura 26a), e o módulo de rigidez secante (J_{sec}) para as extensões de 2%, 5%, 10% e para a extensão na rotura ($J_{sec(\epsilon_{max})}$) (Figura 26b). Na secção seguinte, embora se apresente o valor da rigidez secante correspondente à extensão de rotura, optou-se por não se discutir esta grandeza pois, trata-se de um valor que varia mediante a extensão de rotura do ensaio. Deste modo, não é possível comparar estes valores pois para os diferentes tipos de danos obtiveram-se rigidezes secantes diferentes fruto da diferente extensão de rotura manifestada por cada uma dessas amostras.

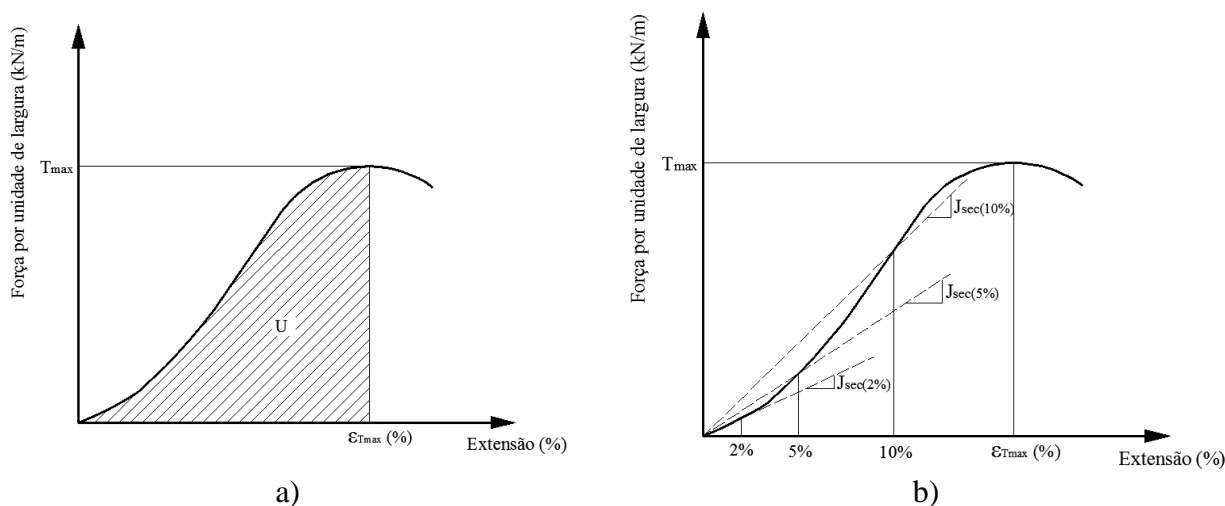


Figura 26. Definição das grandezas: a) módulo de rigidez; b) módulos de rigidez secante.

3.4.1. Geotêxtil não tecido (GTX-N)

3.4.1.1. Provete intactos

Os ensaios de tracção enunciados nesta secção seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.1. Para a medição das extensões usaram-se os alvos que se encontram na Figura 27 sendo estes afixados ao provete por intermédio de alfinetes a fim de evitar o deslocamento durante o ensaio.

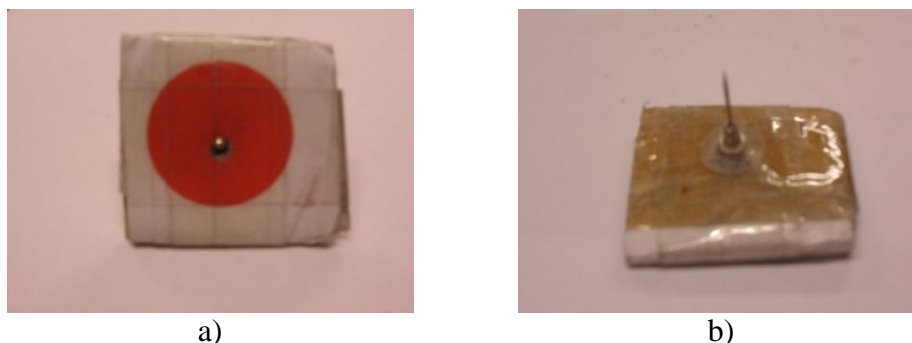


Figura 27. Alvos utilizados na medição da extensão: a) vista frontal; b) vista posterior.

Deste modo apresentam-se, na Tabela 8, os resultados obtidos no ensaio de tracção do geotêxtil GTX-N. Dessa tabela constam a força máxima e a respectiva extensão na rotura, os valores da robustez (U) e o módulo de rigidez secante para as extensões de 2%, 5% e 10% ($J_{\text{sec (2\%)}}$; $J_{\text{sec (5\%)}}$ e $J_{\text{sec (10\%)}}$ respectivamente) sendo estas duas últimas grandezas calculadas por intermédio da curva aproximada (polinómio de grau 5 definido até ao instante em que ocorre a rotura) de cada provete.

Tabela 8. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) intacto.

Provete	T_{max} (kN/m)	ϵ_{max} (%)	$J_{\text{sec (2\%)}}$ (kN/m)	$J_{\text{sec (5\%)}}$ (kN/m)	$J_{\text{sec (10\%)}}$ (kN/m)	$J_{\text{sec (}\epsilon_{\text{max}}\text{)}}$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	73,10	108,78	229,90	158,33	135,19	67,20	5552,92
Provete 2	68,47	104,37	210,10	140,96	126,06	48,53	4539,86
Provete 3	67,61	100,98	127,00	107,77	105,65	66,96	4430,55
Provete 4	66,03	105,95	149,63	117,58	96,06	62,32	4644,16
Provete 5	66,71	119,61	129,45	100,84	98,98	55,77	5296,54
Valor médio	68,38	107,94	169,22	125,10	112,39	60,16	4892,81
Desvio padrão	2,79	7,11	47,70	23,98	17,31	7,98	499,71
C. Variação (%)	4,08	6,58	28,19	19,17	15,40	13,27	10,21

Da análise da tabela anterior, constata-se que o valor médio da resistência à tracção é de 68,38kN/m sendo este valor claramente superior ao valor apresentado pelo fabricante (55kN/m). No que concerne à extensão na rotura esta apresenta um valor médio de 107,94% que é ligeiramente superior ao valor disponibilizado pelo fabricante (105%). Para as grandezas apresentadas

anteriormente, resistência à tracção e extensão na rotura, os coeficientes de variação são, respectivamente, de 4,08% e de 6,58%.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 169,22kN/m, 125,10kN/m e 112,39kN/m e os coeficientes de variação associados são 28,19%, 19,17% e 15,40% para $J_{\text{sec}(2\%)}$, $J_{\text{sec}(5\%)}$ e $J_{\text{sec}(10\%)}$ respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 4892,81kN/m apresentando um coeficiente de variação de 10,21%.

Na Figura 28, apresentam-se as curvas força-extensão obtidas nos ensaios de tracção dos provetes intactos do geotêxtil ensaiado no âmbito do presente estudo laboratorial. Inclui-se ainda a curva média correspondente.

Nessa mesma figura pode-se constatar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento muito semelhante e homogêneo, embora apresentem pequenas perturbações que evidenciam algum deslocamento dos alvos durante o ensaio, causando pequenos erros de leitura com o vídeo extensómetro. É de frisar que no provete 3 ocorreu uma perturbação pontual que porventura estará relacionada com algum efeito local porém, imediatamente a seguir a essa perturbação, a curva retoma a trajectória inicial, pelo que não houve a necessidade de se repetir o referido ensaio.

Relativamente à rotura esta ocorreu de uma forma abrupta e de um modo geral ocorreu próximo das extremidades de fixação e em toda a largura do provete.

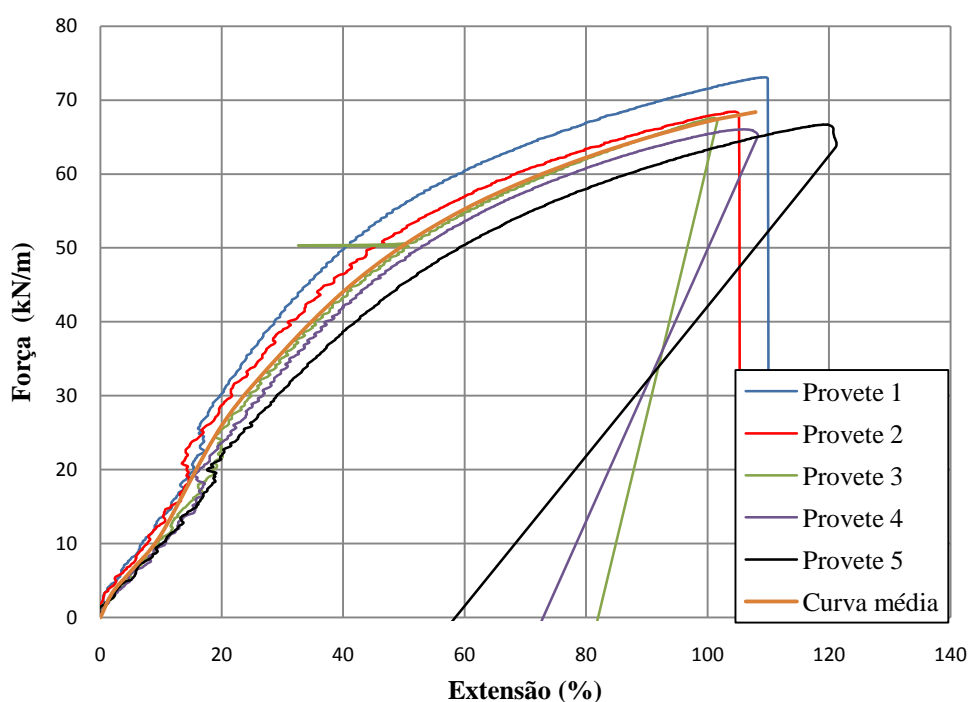


Figura 28. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média.

3.4.1.2. Provetes submetidos à abrasão

Os ensaios de abrasão, em provetes intactos, seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.4. A danificação induzida provocou a desagregação parcial da camada superficial do geotêxtil sem que ocorresse o destacamento dos filamentos da estrutura do geotêxtil, e a reorientação preferencial dos filamentos na direcção do movimento da placa deslizante (direcção de fabrico do material), tal como se pode observar na Figura 29a. Os efeitos descritos estão de acordo com os processos de abrasão observados por Van Dine *et al.* (1982), apresentados na Tabela 5 (secção 2.6.2).

Na Figura 29b, é apresentado o aspecto da camada superficial do geotêxtil que esteve em contacto com a película abrasiva P24, utilizada na sua fixação à placa superior (estacionária). Na referida figura pode-se observar que a camada do GTX em contacto com a película abrasiva P24 permaneceu intacta.

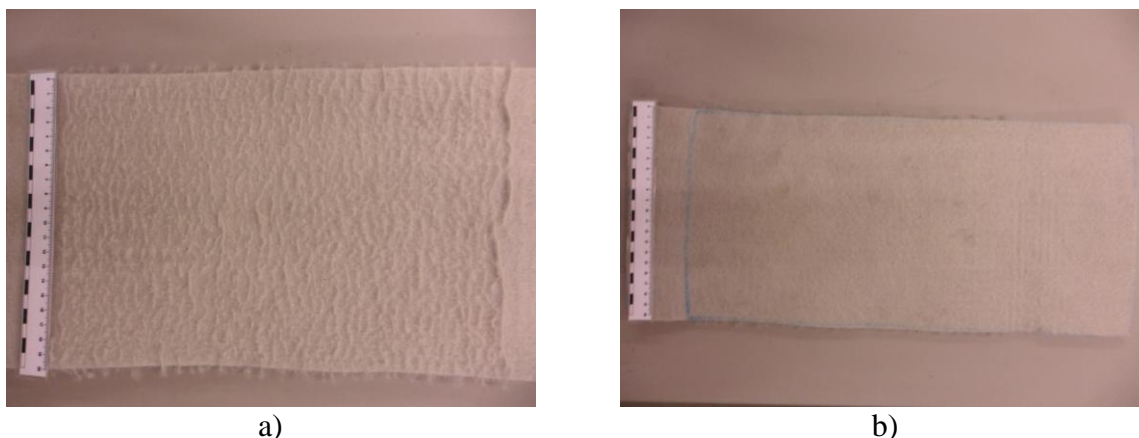


Figura 29. Proвете de GTX-N após ensaio de abrasão: a) face que foi sujeita à abrasão; b) face que ficou em contacto com a película abrasiva P24.

Na Tabela 9 e na Figura 30, apresentam-se, respectivamente, os valores obtidos nos ensaios de tracção de amostras do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de abrasão e as curvas força-extensão dos provetes e a correspondente curva média.

Tabela 9. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de abrasão.

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	61,68	100,32	213,90	158,00	162,56	61,49	4219,71
Provete 2	58,02	98,88	205,86	141,81	123,76	38,50	3795,56
Provete 3	60,01	97,66	404,99	234,64	168,06	61,42	4034,31
Provete 4	63,37	121,70	271,39	169,50	134,07	52,06	5269,49
Provete 5	55,39	97,09	180,30	132,10	140,08	57,05	3611,47
Valor médio	59,69	103,13	255,29	167,21	145,70	54,10	4186,11
Desvio padrão	3,12	10,45	90,07	40,36	18,92	9,55	648,20
C. Variação (%)	5,22	10,14	35,28	24,14	12,99	17,64	15,48

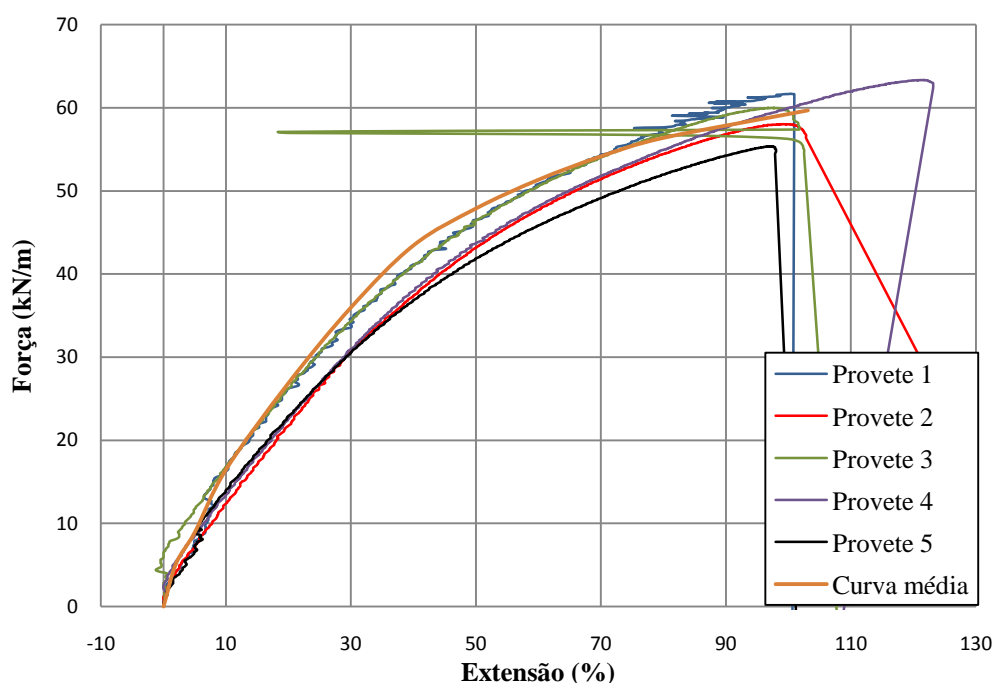


Figura 30. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de abrasão.

A resistência à tracção obtida após abrasão é de 59,69kN/m (cerca de 12,71% inferior ao valor das amostras intactas), e o coeficiente de variação associado é de 5,22%.

A extensão na rotura é de 103,13%, cerca de 4,46% inferior à extensão do material intacto ($\epsilon=107,94\%$), com um coeficiente de variação de 10,14%.

O módulo de rigidez secante aumentou e tem o valor de 255,29kN/m, 167,21kN/m e 145,70kN/m, e os coeficientes de variação associados são 35,28%, 24,14% e 12,99% para $J_{\text{sec}} (2\%)$, $J_{\text{sec}} (5\%)$ e $J_{\text{sec}} (10\%)$, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 4186,11kN/m que é inferior à robustez das amostras intactas ($U=4892,81\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 15,48%.

Nestes ensaios, as curvas força-extensão também apresentam um desenvolvimento muito semelhante e homogéneo, embora apresentem forças e extensões de rotura que se afastam, ligeiramente, umas das outras. É de referir que no provete 3 surgiu uma perturbação pontual que porventura estará relacionado com algum efeito local porém, essa perturbação ocorreu após a rotura do provete pelo que não houve a necessidade de se repetir o referido ensaio.

Mais uma vez, à semelhança das amostras intactas a rotura ocorreu de uma forma abrupta e ocorreu, em alguns casos, próximo das extremidades de fixação e noutros segundo a diagonal, tal como se pode observar na Figura 31.

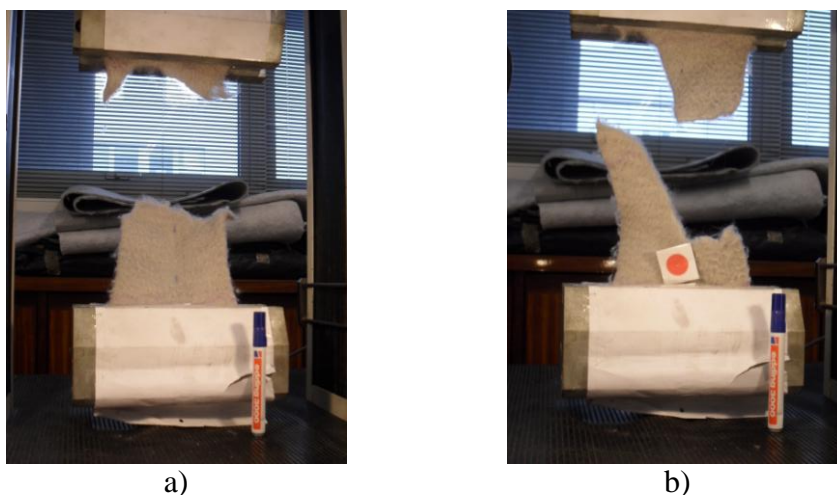


Figura 31. Modo de rotura dos provetes do GTX-N submetidos à abrasão: a) rotura junto aos apoios de fixação; b) rotura com um desenvolvimento diagonal.

3.4.1.3. Provetes de referência para a DDI

Os ensaios de referência para a DDI, em provetes intactos, seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.3 em que os provetes intactos foram submetidos a uma carga estática a uma tensão de 900kPa durante 60 segundos. A danificação induzida, não provocou danos severos pelo facto de este material apresentar uma elevada espessura que se traduz, evidentemente, numa massa por unidade de área significativa (1000g/m^2). Deste modo os danos manifestam-se maioritariamente por abrasão superficial e contusões superficiais, embora alguns provetes apresentem pequenas perfurações como é o caso dos provetes 4 e 5, tal como se pode observar na Figura 32. Após a danificação os provetes foram cortados com as dimensões adequadas para o ensaio de tracção.

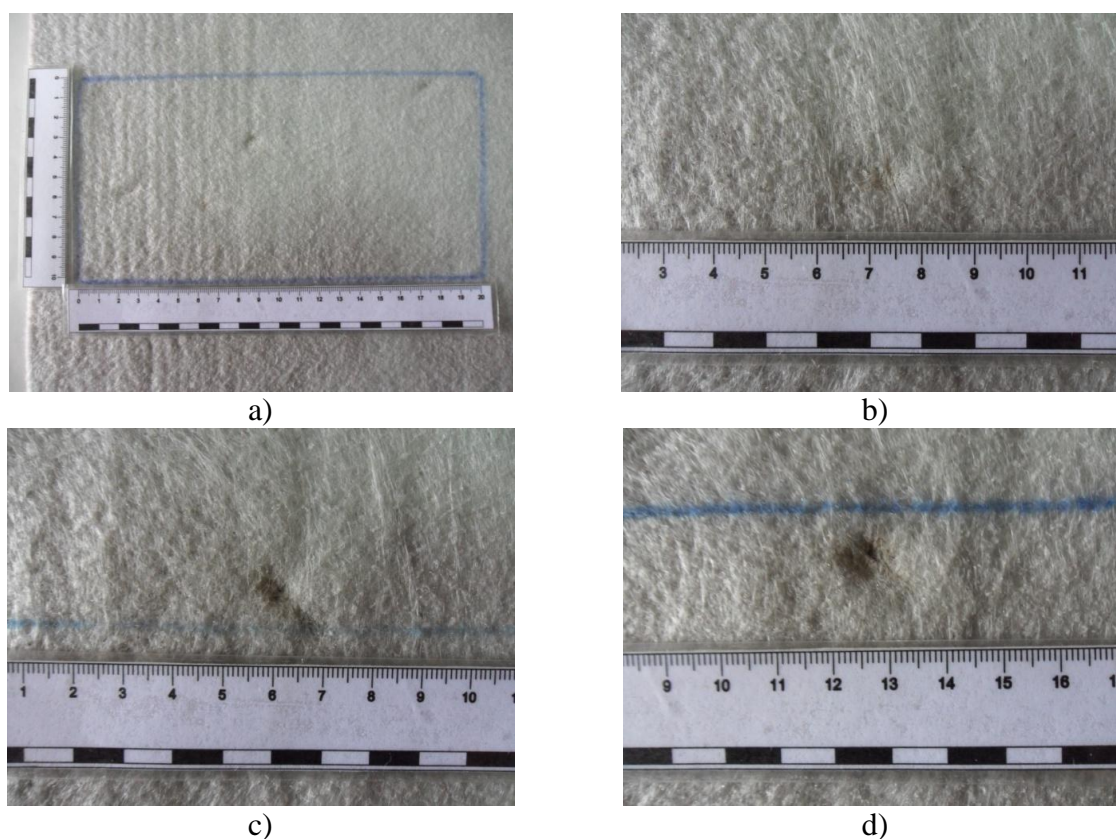


Figura 32. Danos induzidos nos provetes de geotêxtil (GTX-N): a) vista geral; b) abrasão superficial; c) contusões superficiais; d) perfuração do provete.

Na Tabela 10 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de tracção de amostras do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de referência para a DDI. As curvas força-extensão dos provetes e a curva média encontram-se na Figura 33.

Tabela 10. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	62,48	88,59	432,40	245,38	182,24	70,53	3829,34
Proвете 2	70,56	92,23	150,97	156,17	184,96	53,60	4446,75
Proвете 3	67,75	98,75	258,02	205,28	182,95	68,59	4636,87
Proвете 4	55,60	58,38	237,69	264,19	189,57	95,24	2073,89
Proвете 5	62,56	79,18	199,71	132,92	155,44	78,97	3189,28
Valor médio	63,79	83,43	255,76	200,79	179,03	73,39	3635,23
Desvio padrão	5,74	15,69	106,84	56,18	13,49	15,26	1041,18
C. Variação (%)	9,00	18,80	41,77	27,98	7,54	20,79	28,64

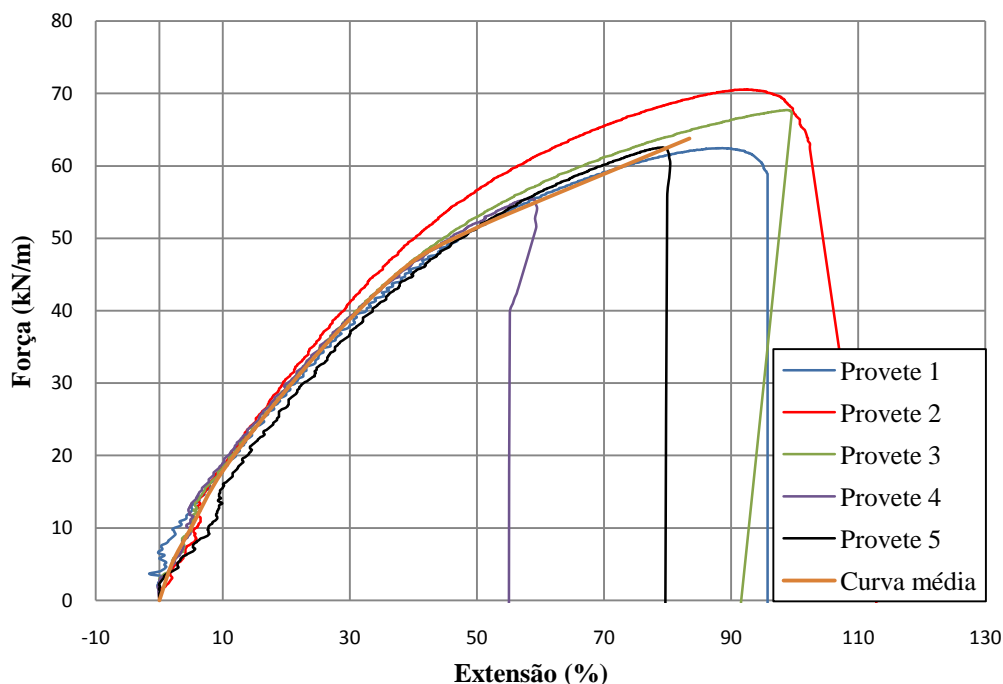


Figura 33. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

A resistência à tracção obtida é de 63,79kN/m sendo este valor ligeiramente inferior ao valor das amostras intactas (68,38kN/m), e o valor do coeficiente de variação é de 9%.

Relativamente à extensão na rotura esta apresenta uma redução de 22,71% face à extensão média dos provetes intactos, obtendo-se, deste modo, um valor médio de 83,43% que é inferior ao valor disponibilizado pelo fabricante (105%) e o respectivo coeficiente de variação é de 18,80%.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 255,76kN/m, 200,79kN/m e 179,03kN/m e os coeficientes de variação associados são 41,77%, 27,98% e 7,54% para $J_{\text{sec}(2\%)}$, $J_{\text{sec}(5\%)}$ e $J_{\text{sec}(10\%)}$, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 3635,23kN/m que é inferior à robustez das amostras intactas ($U=4892,81\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 28,64%.

Nestes ensaios, as curvas força-extensão também apresentam um desenvolvimento muito semelhante e homogéneo, embora apresentem forças e extensões de rotura que, de certo modo, se afastam umas das outras. É de referir que no provete 1 surgiram, inicialmente, pequenas extensões negativas que indiciam que o provete não se encontrava devidamente tenso aquando do início do ensaio. Porém, a reduzida amplitude dessas extensões determinaram que não era necessário repetir o ensaio. Mais uma vez, à semelhança das amostras intactas a rotura ocorreu de uma forma abrupta e ocorreu, em alguns casos, próximo das extremidades de fixação e noutros segundo a diagonal tal como se pode observar na Figura 34. Nos provetes que apresentavam pequenas perfurações

verificou-se, para uma dada força de tracção, o aumento progressivo dessa perfuração culminando com a respectiva rotura do provete, Figura 34c.

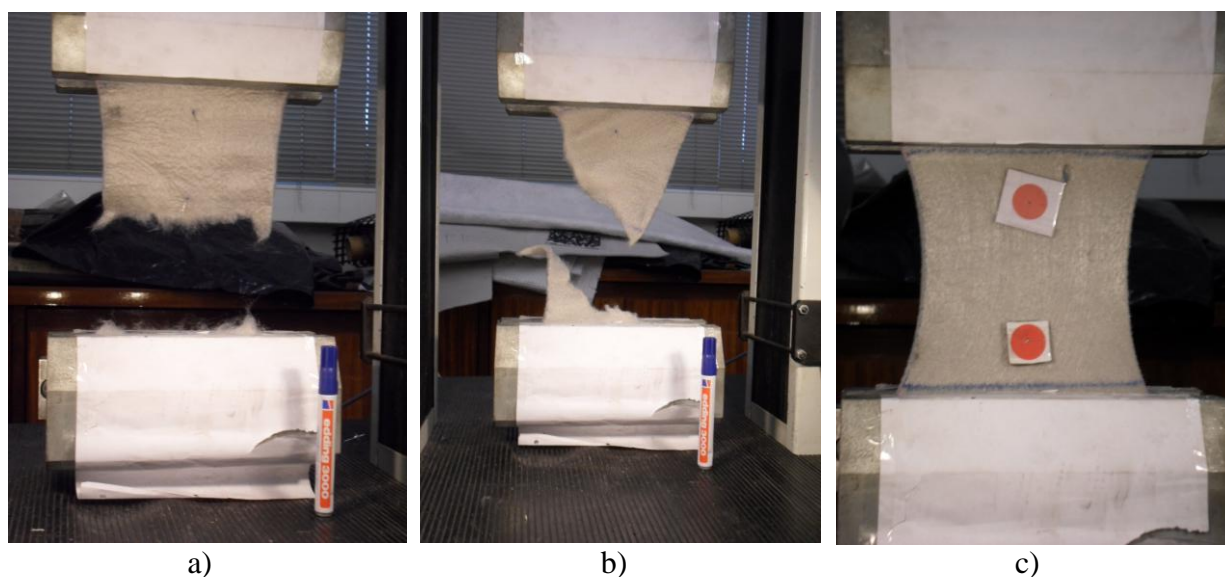


Figura 34. Modo de rotura dos provetes de referência para a DDI: a) rotura junto aos apoios de fixação; b) rotura com um desenvolvimento diagonal; c) aumento progressivo de uma pequena perfuração.

3.4.1.4. Provetes submetidos à DDI

Os ensaios de simulação da DDI, em provetes intactos, seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.3 em que os provetes intactos foram submetidos a um carregamento sendo este efectuado ao longo de 200 ciclos, a uma frequência de 1Hz, com uma carga cíclica a variar entre os $5\pm 5\text{kPa}$ e os $900\pm 10\text{kPa}$. Deste ensaio resultaram danos pouco severos, dada a elevada espessura do material que se traduz, evidentemente, numa elevada massa por unidade de área (1000g/m^2), que se manifestaram maioritariamente por abrasão e contusões superficiais, tal como se pode observar na Figura 35.

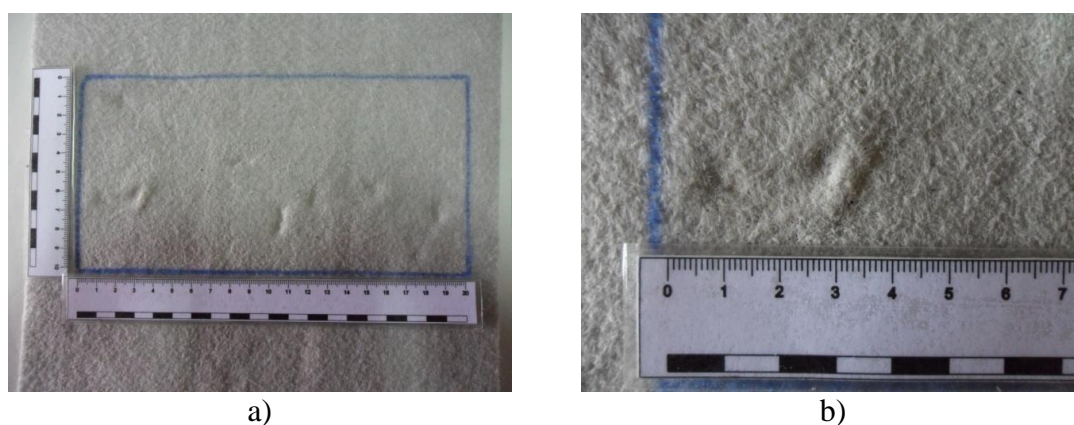


Figura 35. Danos induzidos nos provetes de geotêxtil (GTX-N): a) vista geral; b) pormenor de uma contusão superficial.

Na Tabela 11 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de tracção de amostras do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de DDI. As curvas força-extensão dos provetes e a curva média encontram-se na Figura 36.

Tabela 11. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil após a realização dos ensaios de DDI.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	68,54	82,80	173,38	135,06	187,95	82,78	3746,71
Proвете 2	59,90	90,68	130,36	123,51	136,76	48,13	3581,15
Proвете 3	60,95	83,33	225,62	173,53	175,19	73,14	3445,33
Proвете 4	58,01	75,04	266,83	170,71	176,11	77,31	2948,53
Proвете 5	62,97	92,78	108,77	107,01	104,01	67,86	3867,27
Valor médio	62,08	84,93	180,99	141,96	156,00	69,84	3517,80
Desvio padrão	4,04	7,06	65,57	29,30	34,88	13,32	356,32
C. Variação (%)	6,50	8,32	36,23	20,64	22,36	19,07	10,13

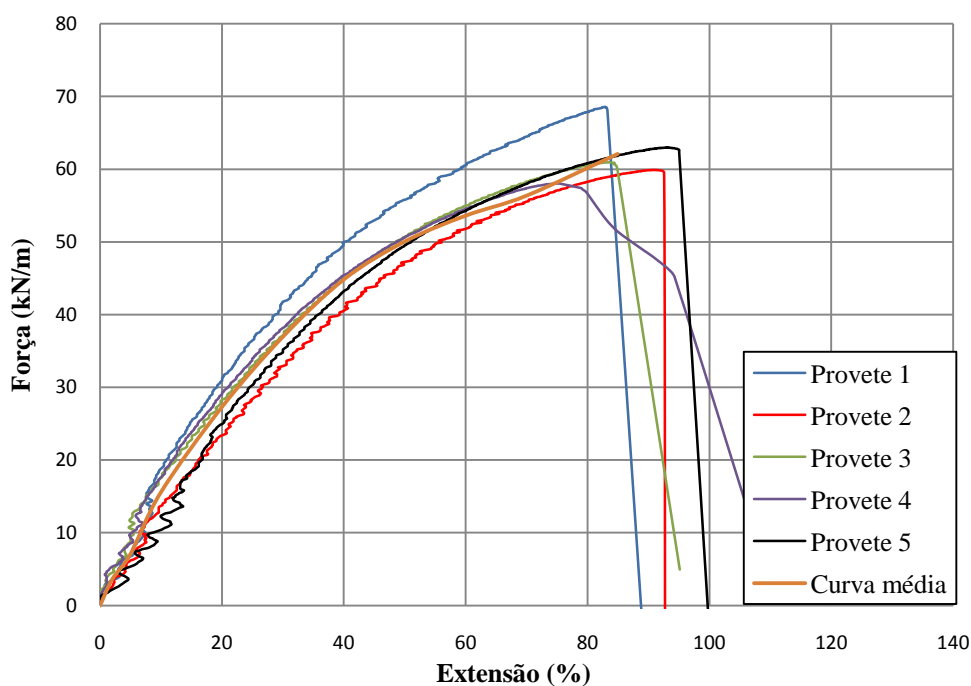


Figura 36. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de DDI.

Os provetes submetidos à DDI apresentam uma resistência à tracção média de 62,08kN/m, tendo esta, sofrido uma redução de 2,68% face à resistência à tracção evidenciada pelos provetes de referência para a DDI e o correspondente coeficiente de variação é de 6,50%.

No que diz respeito à extensão na rotura esta sofreu um ligeiro aumento, cerca de 1,80% relativamente à extensão manifestada pelos provetes de referência para a DDI, apresentando um coeficiente de variação de 8,32%.

O módulo da rigidez secante diminuiu, face aos provetes de referência, apresentando um valor médio de 180,99kN/m, 141,96kN/m e 156,00kN/m e os coeficientes de variação associados são 36,23%, 20,64% e 22,36% para $J_{\text{sec}(2\%)}$, $J_{\text{sec}(5\%)}$ e $J_{\text{sec}(10\%)}$, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 3517,80kN/m que é inferior à robustez das amostras de referência ($U=3635,23\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 10,13%.

As curvas força-extensão seguem o mesmo desenvolvimento, embora apresentem forças e extensões de rotura que se afastam umas das outras. Em todo o percurso das curvas força-extensão são visíveis pequenas perturbações que estão relacionadas com eventuais deslocamentos sofridos pelos alvos, pois o material de ensaio é extremamente poroso o que possibilita algum deslocamento dos alvos. Nestes ensaios a rotura ocorreu de uma forma abrupta e surgiu na zona central do provete tal como se pode observar na Figura 37.

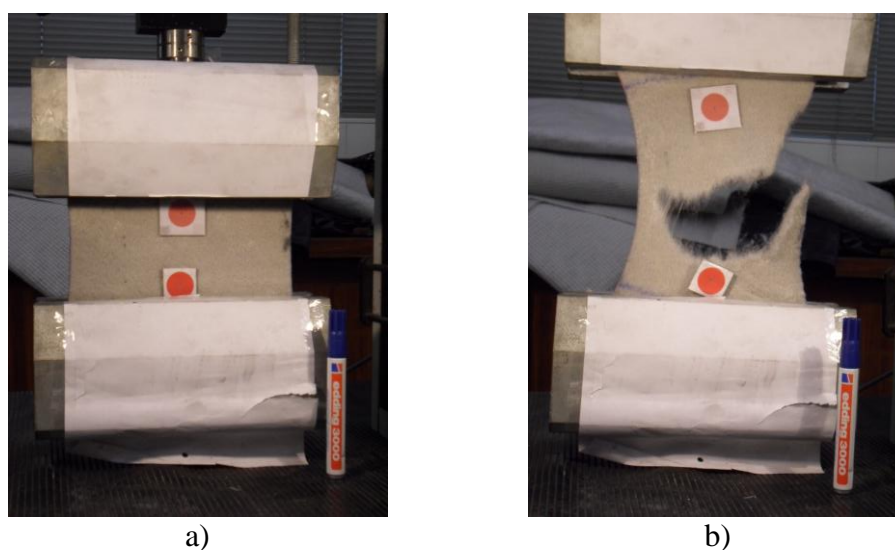


Figura 37. Modo de rotura dos provetes de geotêxtil (GTX-N) submetidos à DDI: a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete.

3.4.1.5. Provetes submetidos à DDI + Abrasão

Os efeitos observados após abrasão das amostras previamente submetidas a DDI estão de acordo com o especificado por Van Dine *et al.* (1982), apresentados na Tabela 5 (secção 2.6.2), em que se verifica o alinhamento dos filamentos, a desagregação superficial do geotêxtil, e o corte dos filamentos superficiais. Na Figura 38 é possível verificar a reorientação dos filamentos, desagregados da estrutura do geotêxtil, na direcção do movimento da placa deslizante (direcção de fabrico).

Atendendo aos efeitos observados após abrasão, pode-se inferir, embora não seja visível a olho nu, que durante o processo de DDI ocorreu o corte dos filamentos superficiais do geotêxtil, permitindo a reorientação dos mesmos aquando da abrasão.

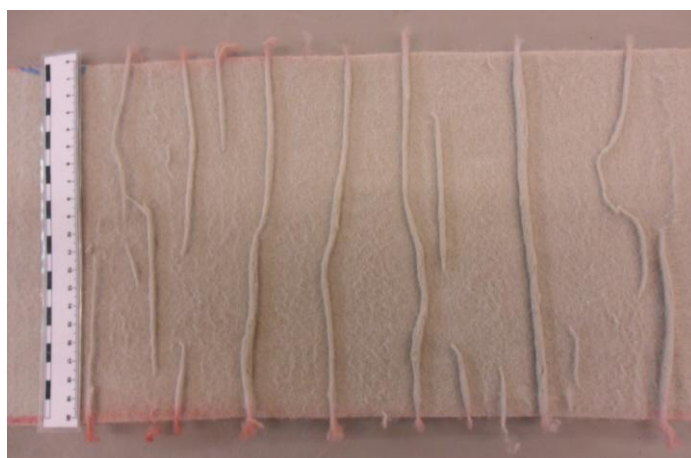


Figura 38. Aspecto apresentado pelo geotêxtil após ensaios de DDI e de Abrasão.

Na Tabela 12 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de tracção de amostras do geotêxtil (GTX-N) após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão e na Figura 39 são apresentadas as curvas força-extensão dos provetes e a respectiva curva média.

Tabela 12. Resultados do ensaio de tracção do geotêxtil após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	55,51	89,26	191,13	182,93	135,51	62,17	3240,59
Proвете 2	52,09	71,29	207,45	190,52	137,15	56,27	2344,95
Proвете 3	62,24	99,21	167,40	148,24	158,46	62,74	4201,42
Proвете 4	56,28	71,20	379,44	227,07	168,33	79,05	2614,14
Proвете 5	51,73	74,41	194,16	202,13	151,11	69,52	2509,96
Valor médio	55,57	81,07	227,91	190,18	150,11	65,95	2982,21
Desvio padrão	4,24	12,58	85,93	28,79	14,00	8,70	761,22
C. Variação (%)	7,63	15,52	37,70	15,14	9,33	13,19	25,53

A resistência à tracção destas amostras é de 55,57kN/m, inferior ao valor das amostras intactas (cerca de 18,73%), e o coeficiente de variação correspondente é de 7,63%. Para a extensão na força máxima obteve-se um valor médio de 81,07%, inferior ao valor de 107,94%, apresentado pelas amostras intactas, com um coeficiente de variação de 15,52%.

O módulo da rigidez secante aumenta, face aos provetes intactos, apresentando um valor médio de 227,91kN/m, 190,18kN/m e 150,11kN/m e os coeficientes de variação associados são

37,70%, 15,14% e 9,33% para $J_{\text{sec}(2\%)}$, $J_{\text{sec}(5\%)}$ e $J_{\text{sec}(10\%)}$, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 2982,21kN/m que corresponde a cerca de metade da robustez das amostras de intactas ($U=4892,81\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 25,53%.

Relativamente à rotura, esta ocorreu maioritariamente na zona central do provete tal como se pode observar na Figura 40.

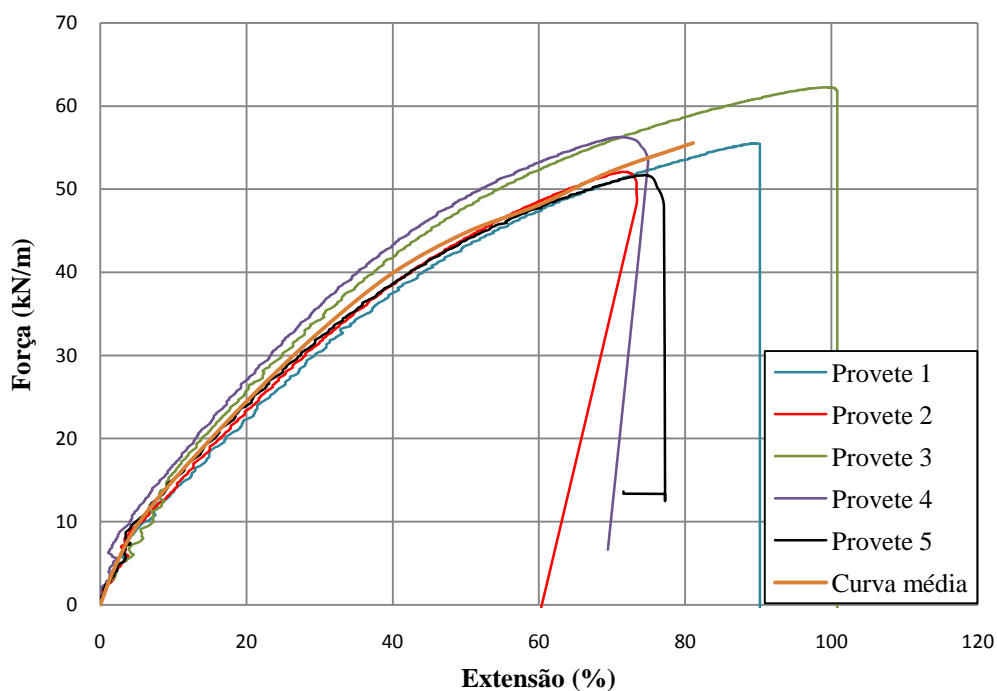


Figura 39. Curvas força-extensão dos provetes do geotêxtil (GTX-N) e respectiva curva média, após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.



a)



b)

Figura 40. Modo de rotura dos provetes de geotêxtil (GTX-N) submetidos à DDI e à abrasão: a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete.

3.4.2. Geocompósito de reforço (GCR)

3.4.2.1. Provetes intactos

Os ensaios de tracção seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.1. A medição das extensões e a fixação dos alvos seguiram os mesmos pressupostos apresentados anteriormente para o geotêxtil, na secção 3.4.1.1.

Na Tabela 13 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de tracção do geocompósito intacto, em provetes compostos por 24 cordões numa largura de 200mm. À semelhança do descrito na secção 3.4.1.1, também aqui, os valores da robustez e do módulo de rigidez secante (para as extensões de 2%, 5% e 10%) foram calculados a partir da curva aproximada de cada provete. Na Figura 41 apresentam-se as curvas força-extensão referentes aos provetes e a curva média correspondente.

Tabela 13. Resultados do ensaio de tracção dos provetes intactos do geocompósito.

Proвете	T_{max} (kN/m)	ε_{max} (%)	J_{sec} (2%) (kN/m)	J_{sec} (5%) (kN/m)	J_{sec} (10%) (kN/m)	J_{sec} (ε_{max}) (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	52,69	11,17	575,20	565,77	508,43	471,88	334,19
Proвете 2	56,66	10,40	674,42	698,35	563,67	545,00	343,66
Proвете 3^(**)	44,44	6,52	539,24	593,09	----- (*)	652,98	122,53
Proвете 4	50,13	9,80	614,47	644,62	----- (*)	511,54	290,53
Proвете 5	53,76	10,82	738,40	686,27	523,66	497,10	364,65
Valor médio	53,31	10,54	650,62	648,75	521,20	506,38	333,26
Desvio padrão	2,70	0,59	71,33	59,92	31,66	30,52	31,20
C. Variação (%)	5,07	5,57	10,96	9,24	6,07	6,03	9,36

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

(**) Resultado não considerado para a determinação dos valores médios.

Da análise da tabela, verifica-se que o valor médio da resistência à tracção é de 53,31kN/m sendo este valor inferior ao valor apresentado pelo fabricante (55kN/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 10,54% que é ligeiramente superior ao valor disponibilizado pelo fabricante (10%). Para as grandezas apresentadas anteriormente, resistência à tracção e extensão na rotura, os coeficientes de variação são, respectivamente, de 5,07% e de 5,57%.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 650,62kN/m (C.V.=10,96%), 648,75kN/m (C.V.=9,24%) e 521,20kN/m (C.V.=6,07%) para as extensões de 2%, 5% e 10%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 333,26kN/m apresentando um coeficiente de variação de 9,36%.

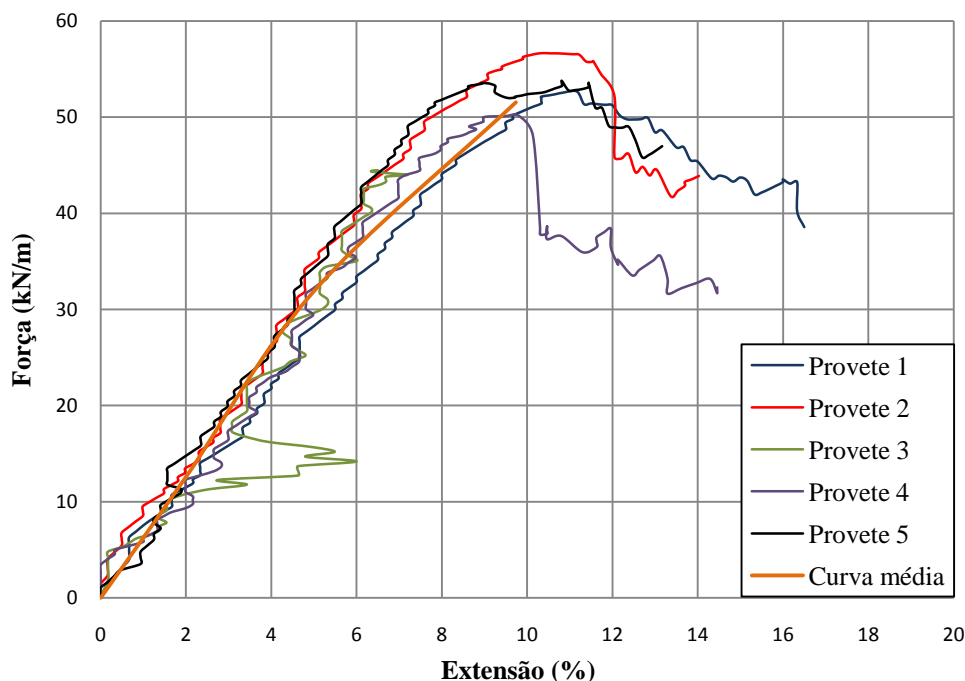


Figura 41. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) intactos e respectiva curva média.

Na Figura 41 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante, embora apresentem pequenas perturbações que evidenciam algum deslocamento dos alvos durante o ensaio, causando pequenos erros de leitura com o vídeo extensómetro. É de frisar que no provete 3 ocorreu, inicialmente, uma perturbação porém, imediatamente a seguir a essa perturbação, a curva retomou a trajectória inicial. No entanto, a resistência à tracção, exibida por este, é notoriamente mais baixa do que a dos restantes provetes. Deste modo, optou-se por desprezar os seus resultados na determinação dos valores médios. Devido à tardia detecção desta discrepância de valores, não foi possível a realização de um ensaio adicional.

Quanto à rotura dos provetes, esta iniciou-se com a rotura dos cordões de poliéster começando por romper os cordões externos e só depois os internos conjuntamente com o material geotêxtil tal como se pode verificar na Figura 42. Por vezes, quando a rotura dos filamentos de poliéster não coincidia com a do material geotêxtil, ocorria um deslocamento desses mesmos filamentos face ao material geotêxtil, tal como se pode verificar na Figura 42c.

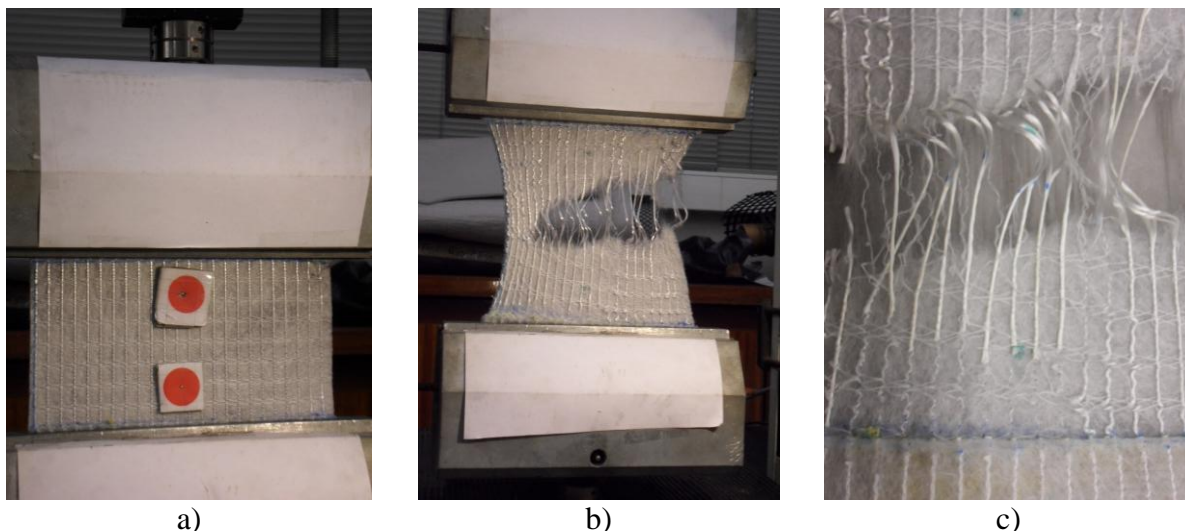


Figura 42. Modo de rotura dos provetes intactos do geocompósito (GCR): a) antes do início do ensaio de tracção; b) após rotura do provete; c) pormenor do deslocamento relativo entre os filamentos de PET e o material geotêxtil.

3.4.2.2. Provetes submetidos à Abrasão

A abrasão induzida no geocompósito (GCR) provocou o destacamento parcial dos filamentos de poliéster da estrutura do geotêxtil e a sua danificação, em que os filamentos, inicialmente entrelaçados, se dividem em dois. Na Figura 43 é possível observar a diferença entre os filamentos de uma amostra intacta e de uma amostra após o ensaio de abrasão.

Os provetes intactos utilizados no ensaio da abrasão tinham as seguintes dimensões: 200mm de largura e 500mm de comprimento, com 24 cordões na sua largura. É de referir que bastava um comprimento de 430mm, porém de modo a evitar o escorregamento dos filamentos de poliéster optou-se por cortar os provetes com um comprimento maior do que o necessário para se efectuarem umas dobras na zona de fixação do provete à placa estacionária. Após o ensaio de abrasão verificou-se uma diminuição da largura dos provetes para cerca de 170mm (Figura 44)

Esta redução de espessura porventura está relacionada com a tensão que se induziu ao provete, por intermédio do esticador, de modo a eliminar as folgas do mesmo.

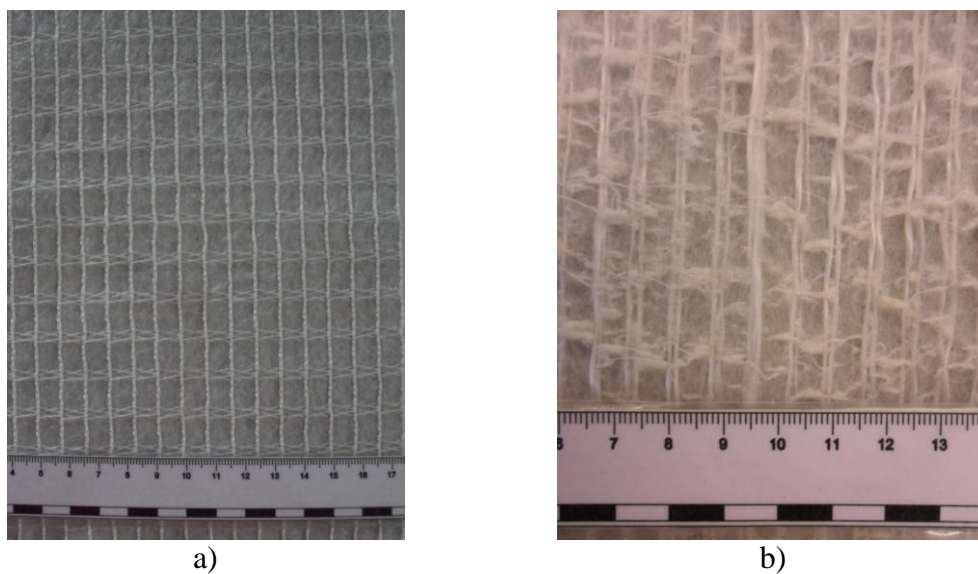


Figura 43. Provete de geocompósito: a) antes do ensaio; b) após ensaio de abrasão.



Figura 44. Aspecto geral do provete de geocompósito após abrasão.

Na Tabela 14 são apresentados os valores da resistência à tracção, da extensão na rotura, dos módulos de rigidez secante para as extensões de 2%, 5% e 10% e a robustez obtidos no ensaio de tracção do geocompósito após abrasão. A Figura 45 mostra as curvas força-extensão dos provetes ensaiados e a correspondente curva média.

Tabela 14. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão.

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	14,53	81,44	215,93	185,34	48,62	17,84	823,11
Provete 2	13,73	83,45	292,20	189,82	58,96	16,44	868,05
Provete 3	11,98	80,17	270,92	179,56	42,55	14,94	675,95
Provete 4	10,70	53,42	268,72	139,29	35,04	20,01	449,81
Provete 5	15,01	103,68	204,53	121,91	53,72	14,47	1080,82
Valor médio	13,19	80,43	250,46	163,19	47,78	16,74	779,55
Desvio padrão	1,81	17,89	38,07	30,59	9,36	2,26	234,50
C. Variação (%)	13,70	22,24	15,20	18,74	19,59	13,48	30,08

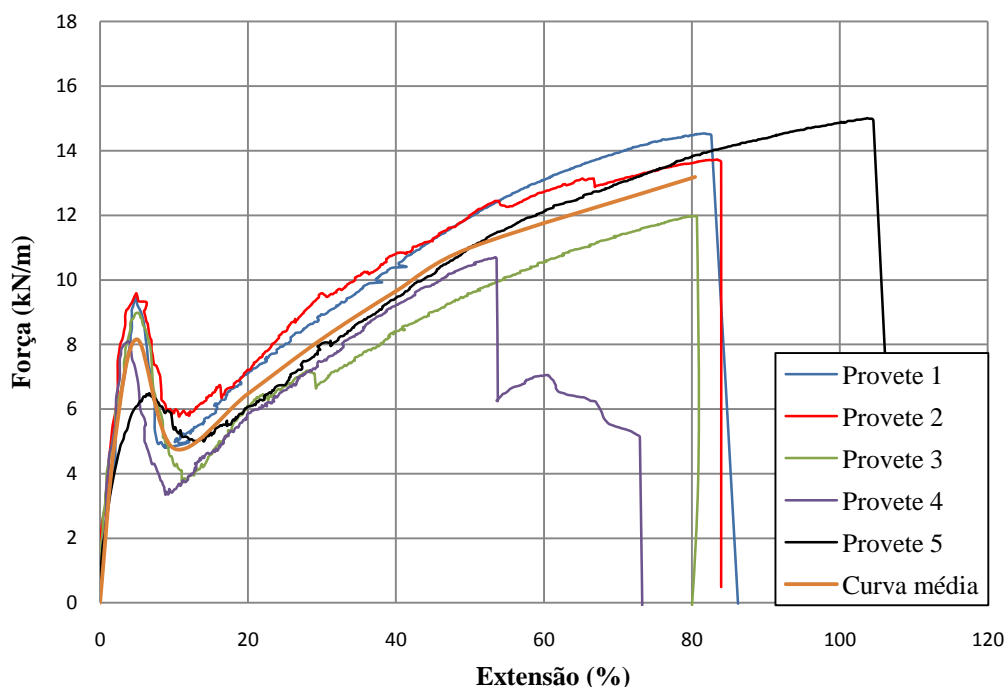


Figura 45. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão e respectiva curva média.

Tal como se pode verificar na Figura 45, as curvas força-extensão apresentam dois “picos” em que o “pico 2” apresenta uma resistência à tracção claramente superior à do “pico 1”. A existência destes dois “picos” está relacionada com o comportamento dos provetes relativamente à aplicação da força de tracção. Ou seja, até se atingir o “pico 1”, foi mobilizada a capacidade resistente dos 24 filamentos de poliéster que se distribuem nos 200mm de largura dos provetes (Figura 46a). Uma vez atingido este pico, os cordões periféricos destacaram-se do material geotêxtil (Figura 46b) e, por conseguinte, ocorreu um decrescimento da resistência à tracção, voltando a aumentar à medida

que se mobilizava, progressivamente, a resistência à tracção do geotêxtil. Quando o geotêxtil atinge a sua capacidade resistente, “pico 2”, o provete rompe e o ensaio termina (Figura 46c).

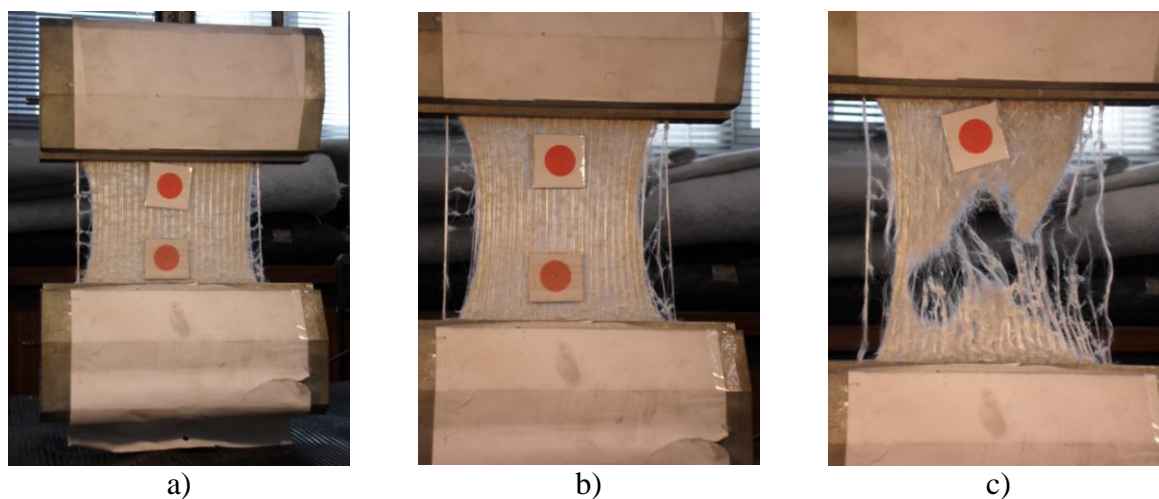


Figura 46. Comportamento à tracção dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão: a) mobilização da capacidade resistente dos filamentos de poliéster (“pico 1”); b) destacamento dos filamentos exteriores (decaimento da resistência à tracção); c) provete após rotura (“pico 2”).

Na Tabela 15 são apresentados os valores, da resistência à tracção e as respectivas extensões, obtidos em cada um dos picos e a robustez.

Tabela 15. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

Provete	Pico 1			Pico 2		
	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	U (kN/m)	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	U (kN/m)
Provete 1	9,51	4,98	27,69	14,53	81,44	823,11
Provete 2	9,58	4,90	32,00	13,73	83,45	868,05
Provete 3	8,99	5,08	31,17	11,98	80,17	675,95
Provete 4	8,10	3,84	20,50	10,70	53,42	449,81
Provete 5	6,49	6,65	31,38	15,01	103,68	1080,82
Valor médio	8,53	5,09	28,55	13,19	80,43	779,55
Desvio padrão	1,29	1,01	4,80	1,81	17,89	234,50
C. Variação (%)	15,08	19,79	16,83	13,70	22,24	30,08

Em termos de resistência à tracção, o valor médio correspondente ao “pico 1” ($T_{\max}=8,53\text{kN/m}$) é 35,33% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{\max}=13,19\text{kN/m}$) embora apresentem coeficientes de variação muito semelhantes, 15,08% e 13,70% para o “pico 1” e “pico 2”, respectivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é de 5,09% (C.V.=19,79%) que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 80,43% (C.V.=22,24%).

Os valores da robustez também apresentam um contraste acentuado em que o “pico 1” apresenta um valor de 28,55kN/m (C.V.=16,83%) e o “pico 2” um valor de 779,55kN/m (C.V.=30,08%).

Apesar da existência destes dois “picos”, em que um deles, “pico 2”, apresenta características claramente superiores à do “pico 1” e tendo em vista futuras comparações de resultados, apenas se podem considerar os valores alusivos ao “pico 1”, pois tratam-se de valores cujas características do provete mantêm-se inalteradas face aos restantes ensaios realizados (mesmo numero de filamentos de poliéster activos). Posto isto, na Tabela 16, apresentam-se os valores correspondentes ao “pico 1” e na Figura 47 apresentam-se as curvas força-extensão e a correspondente curva média.

Tabela 16. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de abrasão (apenas o “pico 1”).

Provete	T_{max} (kN/m)	ε_{max} (%)	J_{sec} (2%) (kN/m)	J_{sec} (5%) (kN/m)	J_{sec} (10%) (kN/m)	J_{sec} (ε_{max}) (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	9,51	4,98	215,93	185,34	----- (*)	186,19	27,69
Provete 2	9,58	4,90	292,20	189,82	----- (*)	195,62	32,00
Provete 3	8,99	5,08	270,92	179,56	----- (*)	176,71	31,17
Provete 4	8,10	3,84	268,72	139,29	----- (*)	210,86	20,50
Provete 5	6,49	6,65	204,53	121,91	----- (*)	97,52	31,38
Valor médio	8,53	5,09	250,46	163,19	----- (*)	173,38	28,55
Desvio padrão	1,29	1,01	38,07	30,59	----- (*)	44,24	4,80
C. Variação (%)	15,08	19,79	15,20	18,74	----- (*)	25,52	16,83

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

Da Tabela 16, verifica-se que o valor médio da resistência à tracção é de 8,53kN/m sendo este valor notoriamente inferior ao valor dos provetes intactos 51,54kN/m. A extensão na rotura apresenta um valor médio de 5,09%. Para as grandezas apresentadas anteriormente, resistência à tracção e extensão na rotura, os coeficientes de variação são, respectivamente, de 15,08% e de 19,79%.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 250,46kN/m (C.V.=15,20%) e 163,19kN/m (C.V.=18,74%) para as extensões de 2% e 5%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 28,55kN/m apresentando um coeficiente de variação de 16,83%.

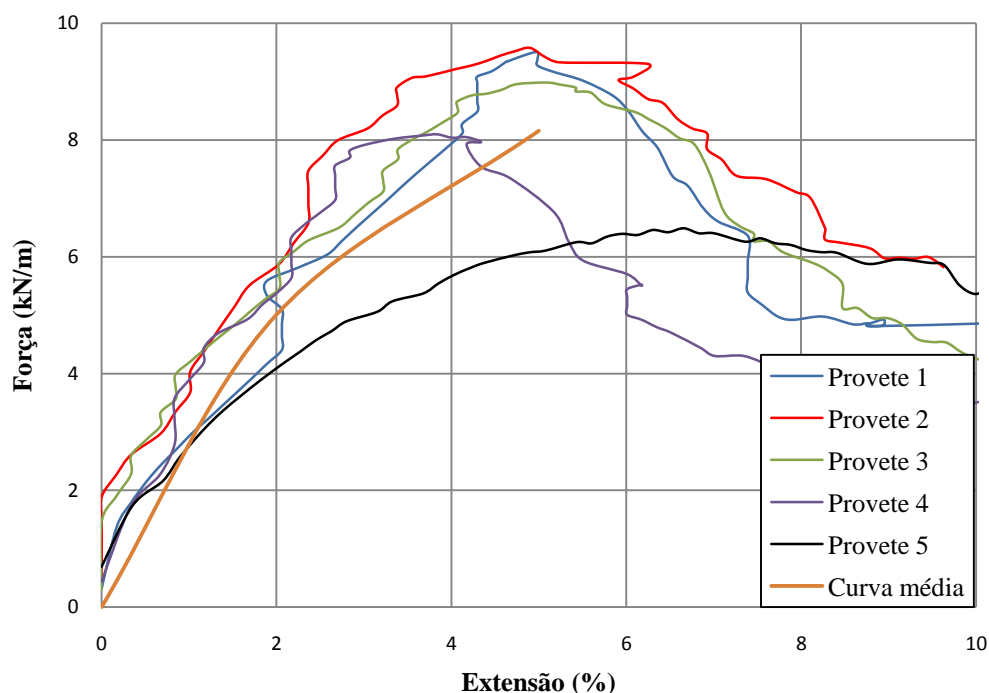


Figura 47. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após abrasão e respectiva curva média (apenas o “pico 1”).

Na Figura 47 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante, embora apresentem alguma irregularidade. As mesmas curvas não iniciam exactamente na origem do gráfico, o que reflecte que o provete antes do ensaio não se encontrava devidamente esticado.

3.4.2.3. Provetes de referência para a DDI

Os ensaios de referência para a DDI seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.3 em que os provetes intactos foram submetidos a uma carga estática a uma tensão de 900kPa durante 60 segundos. Na realização destes ensaios teve-se o cuidado de colocar a face que contém os filamentos de poliéster voltada para baixo de modo a que esta fique em contacto directo com o material do balastro. A danificação induzida provocou danos severos que se manifestam maioritariamente por abrasão superficial, contusões superficiais e perfurações no que respeita ao material geotêxtil (Figura 48b). Quanto aos filamentos de PET estes evidenciavam cortes totais e parciais (Figura 48c) e empolamentos (Figura 48d). Todos estes danos situavam-se na zona da placa de carregamento.

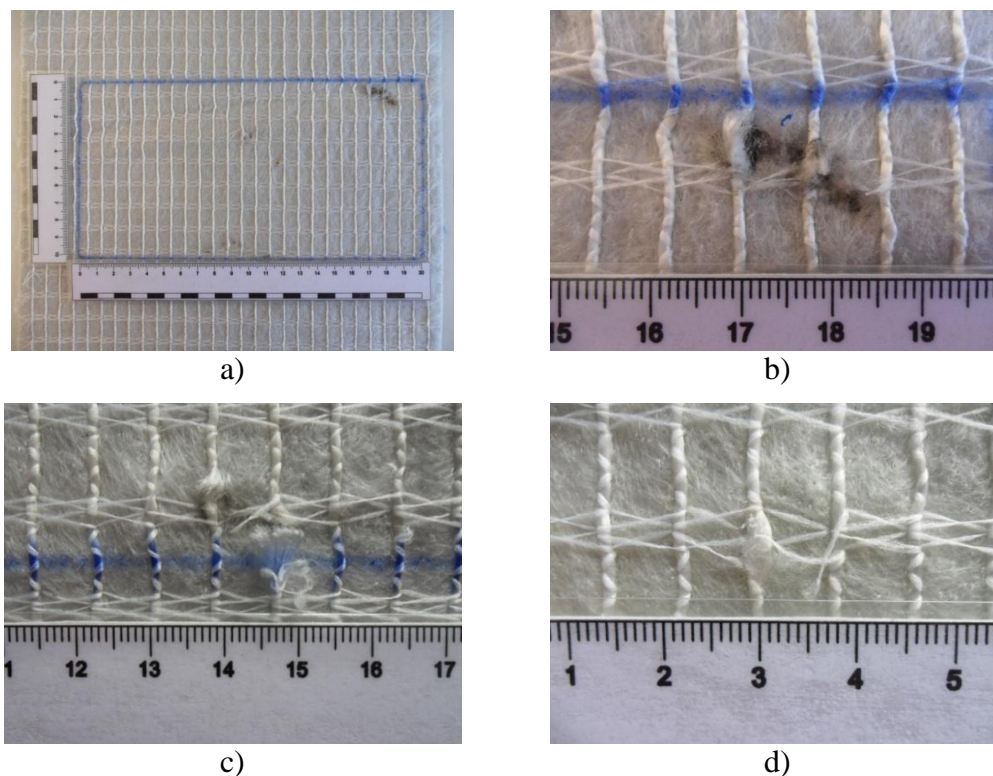


Figura 48. Danos induzidos nos provetes de geocompósito: a) vista geral; b) perfuração do material geotêxtil; c) corte total e parcial dos filamentos de PET; d) empolamento dos filamentos de PET.

Os resultados obtidos nos ensaios de tracção das amostras do geocompósito após a realização dos ensaios de referência para a DDI encontram-se na Tabela 17 e as curvas força-extensão dos provetes e a curva média encontram-se na Figura 49.

Tabela 17. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	36,83	9,37	498,38	487,88	----- (*)	393,22	202,19
Proвете 2	37,04	8,23	446,37	461,10	----- (*)	450,24	157,48
Proвете 3	31,97	9,76	386,91	543,96	----- (*)	292,49	210,16
Proвете 4	40,71	7,62	554,61	522,05	----- (*)	534,50	160,43
Proвете 5	35,77	9,85	569,44	502,60	----- (*)	363,22	223,47
Valor médio	36,46	8,96	491,14	503,52	----- (*)	406,73	190,75
Desvio padrão	3,13	0,99	75,96	31,72	----- (*)	91,30	30,02
C. Variação (%)	8,58	11,06	15,47	6,30	----- (*)	22,45	15,74

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

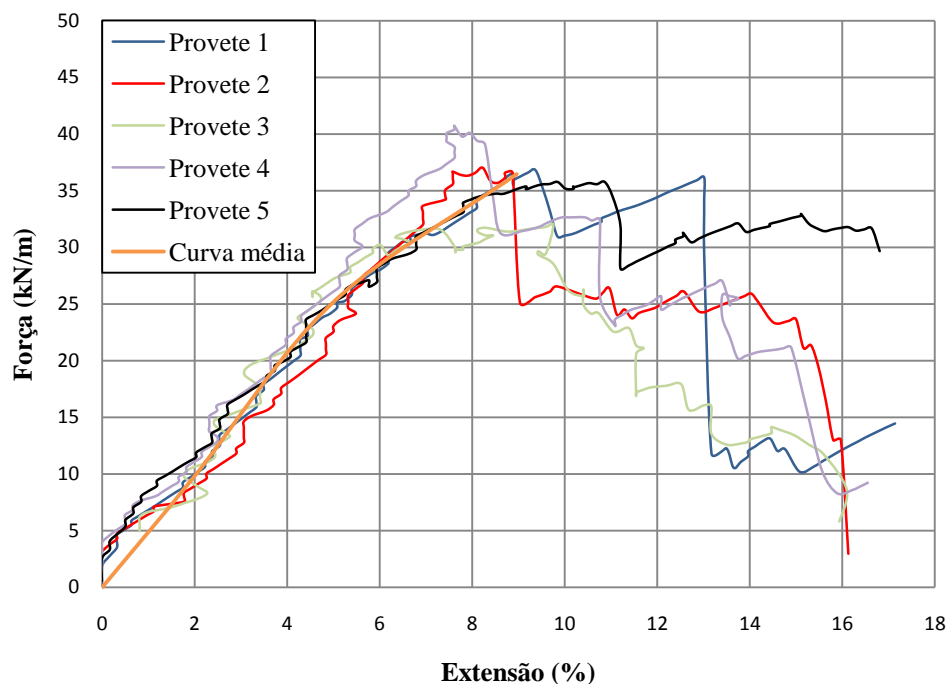


Figura 49. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito após ensaios de referência para a DDI.

O valor médio da resistência à tracção é de 36,46kN/m, reflectindo uma redução de 29,26% da resistência dos provetes intactos 51,54kN/m, tendo associado um coeficiente de variação de 8,58%. A extensão na rotura adopta um valor médio de 8,96% com um coeficiente de variação de 11,06%.

A rigidez secante apresenta um valor inferior ao manifestado pelas amostras intactas sendo de 491,14kN/m (C.V.=15,47%) e 503,52kN/m (C.V.=6,30%) para as extensões de 2% e 5%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 190,75kN/m apresentando um coeficiente de variação de 15,74%.

Na Figura 49 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento idêntico, embora apresentem perturbações que evidenciam algum deslocamento dos alvos durante o ensaio.

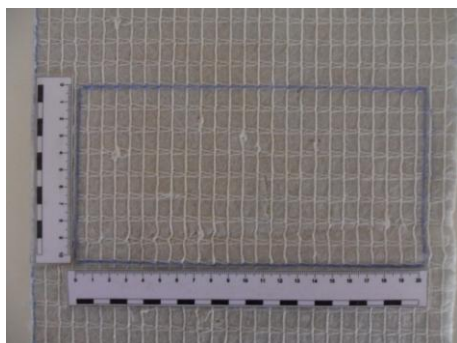
Quanto à rotura dos provetes, apenas ocorreu a rotura dos cordões de PET embora esta não seja tão evidente, tal como se pode constatar na Figura 50.



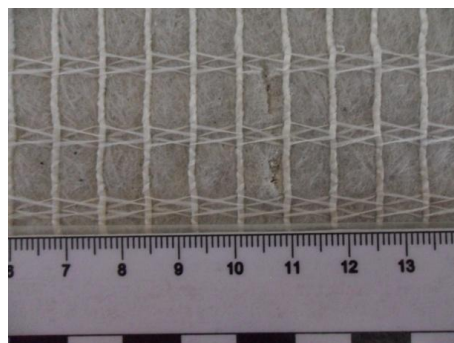
Figura 50. Modo de rotura dos provetes do geocompósito após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

3.4.2.4. Provetes submetidos à DDI

Os ensaios de simulação da DDI, em provetes intactos, seguiram os procedimentos enunciados na secção 3.3.3 em que os provetes intactos foram submetidos a um carregamento sendo este efectuado ao longo de 200 ciclos, a uma frequência de 1Hz, com uma carga cíclica a variar entre os 5 ± 5 kPa e os 900 ± 10 kPa. A orientação da face que contém os filamentos de poliéster (voltada para baixo ou para cima) é indiferente pois, neste ensaio, o provete fica rodeado inferiormente e superiormente pelo material de balastro porém, no presente trabalho colocou-se a face que contém os cordões de poliéster voltada para cima. A danificação induzida provocou danos relevantes que se manifestam maioritariamente por abrasão superficial, contusões superficiais e perfurações no que respeita ao material geotêxtil (Figura 51b). Quando aos filamentos de PET estes evidenciavam cortes totais e parciais (Figura 51c) e empolamentos (Figura 51d). Estes danos estendem-se por toda a zona do provete que fica dentro da caixa de DDI (Figura 51a)



a)



b)

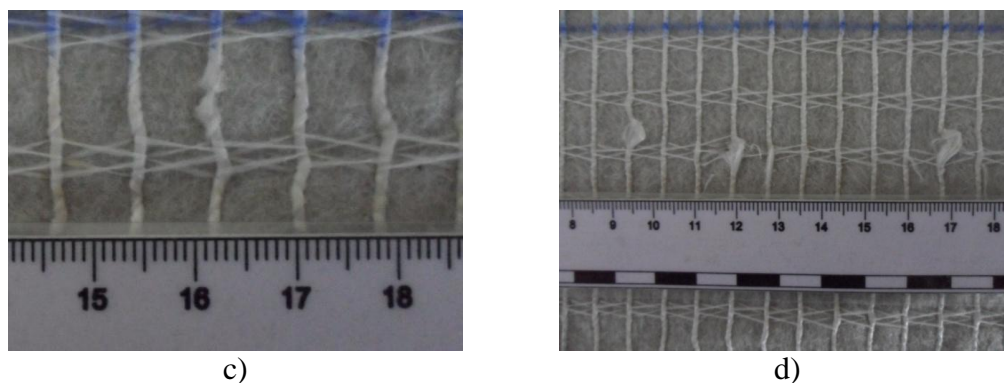


Figura 51. Danos induzidos nos provetes de geocompósito: a) vista geral; b) perfuração do material geotêxtil; c) corte total e parcial dos filamentos de PET; d) empolamento dos filamentos de PET.

Os resultados obtidos nos ensaios de tracção das amostras do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI encontram-se na Tabela 18 e as curvas força-extensão dos provetes e a curva média encontram-se na Figura 52.

Tabela 18. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	27,69	6,96	494,76	424,47	----- (*)	397,79	106,85
Proвете 2	37,30	8,83	760,95	621,00	----- (*)	422,22	217,71
Proвете 3	31,56	10,08	470,67	351,59	314,20	312,95	179,23
Proвете 4	27,48	7,43	594,84	462,24	----- (*)	353,71	130,11
Proвете 5	27,26	8,29	523,69	434,38	----- (*)	328,77	146,95
Valor médio	30,26	8,32	568,98	458,73	314,20	363,09	156,17
Desvio padrão	4,32	1,23	116,99	99,49	----	46,05	43,35
C. Variação (%)	14,26	14,73	20,56	21,69	----	12,68	27,76

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

O valor médio da resistência à tracção é de 30,26kN/m, reflectindo uma redução de 17% da resistência dos provetes de referência 36,46kN, tendo associado um coeficiente de variação de 14,26%. A extensão na rotura adopta um valor médio de 8,32% com um coeficiente de variação de 14,73%.

A rigidez secante apresenta um valor inferior ao manifestado pelas amostras de referência, com excepção do módulo de rigidez secante correspondente a uma extensão de 2% que é superior, sendo de 568,98kN/m (C.V.=20,56%) e 458,73kN/m (C.V.=21,69%) para as extensões de 2% e 5%, respectivamente. Para a extensão de 10%, a rigidez apresentada não pode ser considerada como sendo representativa da amostra pois apenas um provete é que rompeu para uma extensão superior a

10%. A robustez apresenta um valor médio de 156,17kN/m apresentando um coeficiente de variação de 27,76%.

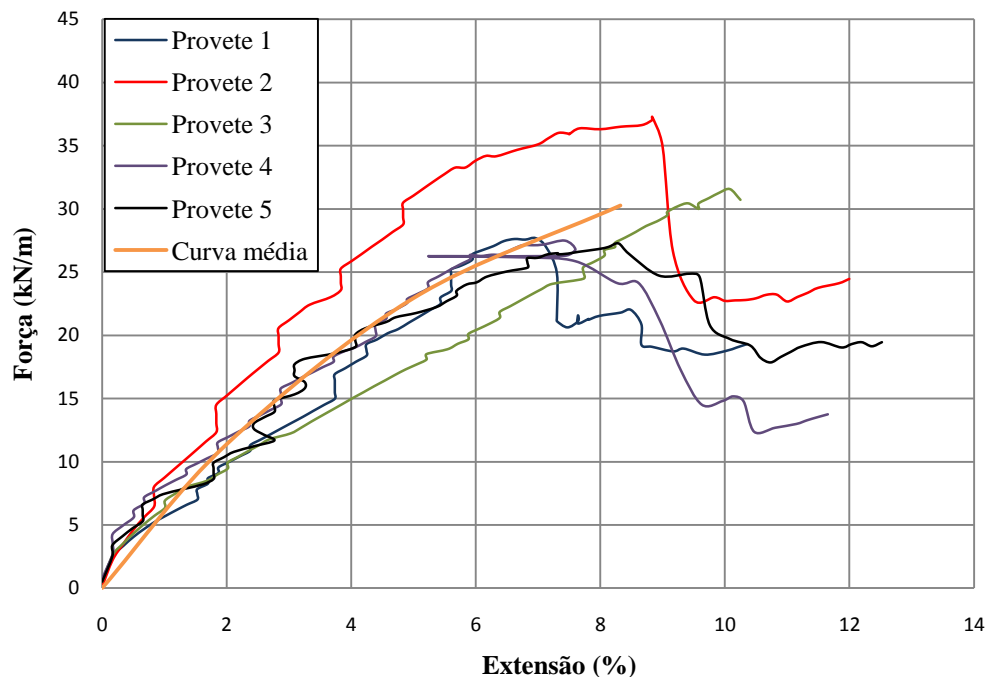


Figura 52. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito após ensaios de DDI.

Na Figura 52 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento idêntico, embora apresentem alguma dispersão de valores aquando da rotura. Essas mesmas curvas apresentam perturbações que evidenciam algum deslocamento dos alvos durante o ensaio, porém é de frisar que a perturbação evidenciada pelo provete 4, pelo facto de surgir após a rotura do mesmo, não provoca qualquer discrepância de valores na rotura do mesmo.

Também nestes ensaios, à semelhança dos ensaios dos provetes de referência, a rotura dos provetes, apenas manifestou-se pela rotura dos cordões de PET.

3.4.2.5. Provetes submetidos à DDI + Abrasão

Após os ensaios de abrasão, nos provetes submetidos a DDI, observou-se o destacamento dos filamentos de PET da estrutura do geotêxtil, a desagregação superficial dos filamentos de PET e do geotêxtil, e ainda o corte e reorientação dos filamentos na direcção do ensaio (Figura 53).

À semelhança do que ocorreu com o geotêxtil, o corte, provocado pela DDI, dos filamentos da estrutura do geotêxtil que constitui o geocompósito, permitiu a desagregação e o alinhamento, na direcção do ensaio, dos filamentos de geotêxtil durante o ensaio de abrasão. Após os ensaios de abrasão verificou-se uma redução da largura média dos provetes devido à contracção lateral dos mesmos.

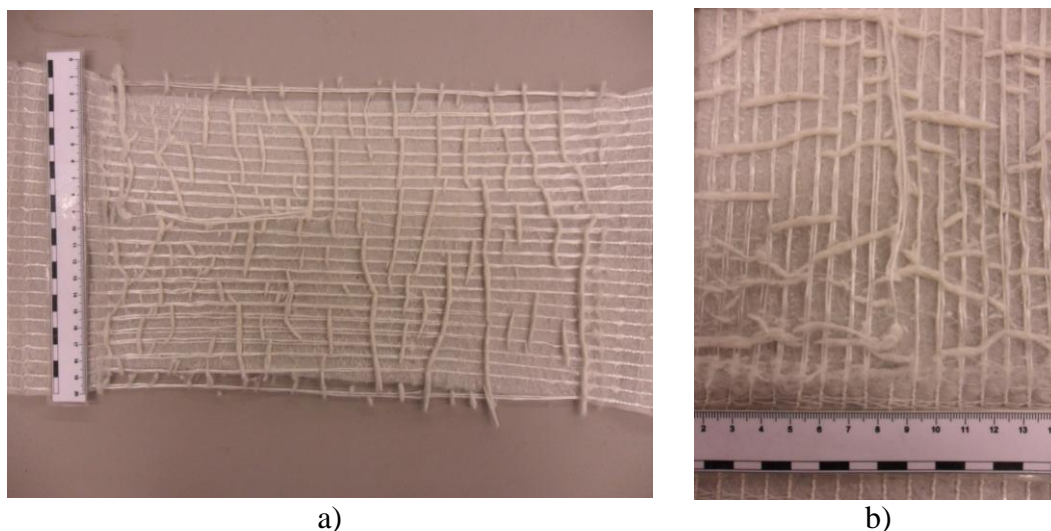


Figura 53. Provete de geocompósito após ensaio de abrasão: a) vista geral; b) pormenor dos danos observados.

Na Tabela 19 são apresentados os valores da resistência à tracção, da extensão na rotura, dos módulos de rigidez secante para as extensões de 2%, 5% e 10% e a robustez obtidos no ensaio de tracção do geocompósito após DDI e abrasão. A Figura 54 mostra as curvas força-extensão dos provetes ensaiados e a correspondente curva média.

Tabela 19. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	9,10	52,36	229,35	146,71	29,66	17,38	306,98
Provete 2	9,87	53,45	254,75	178,80	43,53	18,47	337,30
Provete 3	7,06	45,34	267,62	108,77	34,17	15,57	231,99
Provete 4	11,51	57,07	344,37	95,39	34,85	20,16	443,99
Provete 5	8,98	52,76	263,91	127,29	44,70	17,02	333,32
Valor médio	9,30	52,20	272,00	131,39	37,38	17,72	330,72
Desvio padrão	1,61	4,26	43,13	32,81	6,48	1,72	76,14
C. Variação (%)	17,30	8,16	15,86	24,97	17,33	9,68	23,02

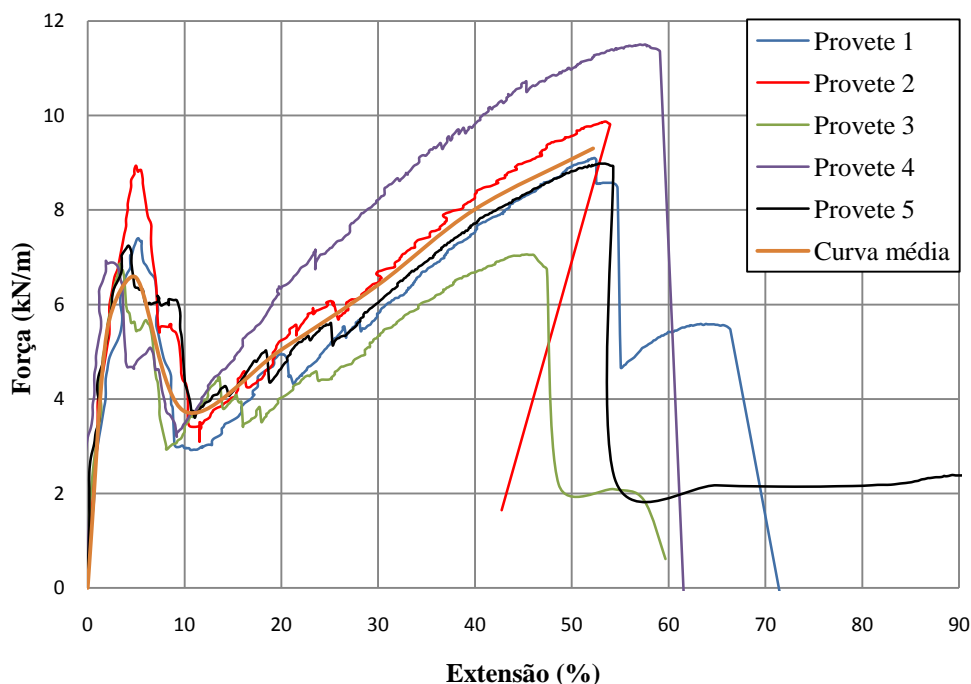


Figura 54. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão e respectiva curva média.

Tal como se pode verificar na Figura 54, as curvas força-extensão apresentam dois “picos” em que o “pico 2” apresenta uma resistência à tracção superior à do “pico 1”. A explicação para a existência destes dois picos encontra-se na secção 3.4.2.2. Na Figura 55 apresenta-se a sequência dos acontecimentos desses fenómenos.

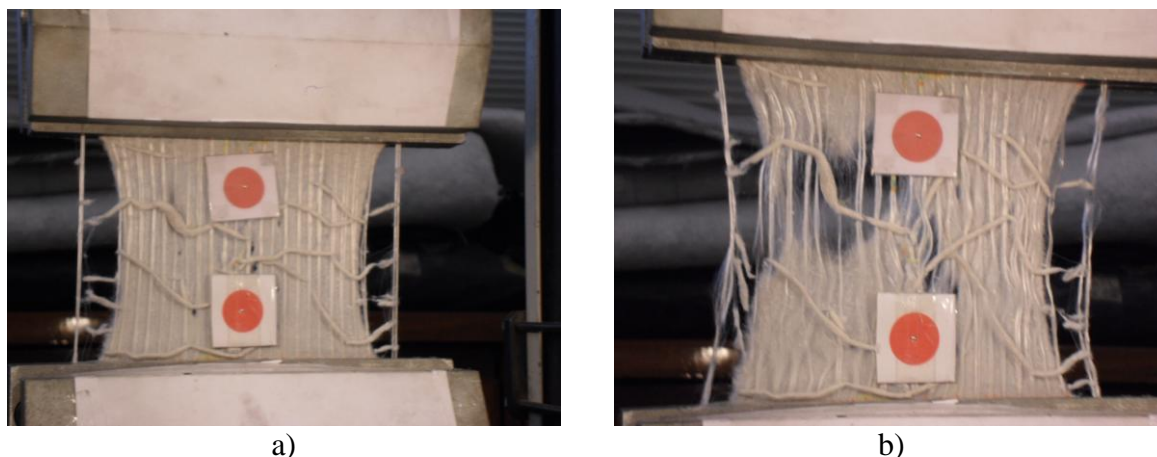


Figura 55. Comportamento à tracção dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão: a) destacamento dos filamentos exteriores (decaimento da resistência à tracção); b) provete após rotura (“pico 2”).

Na Tabela 20 são apresentados os valores, da resistência à tracção e as respectivas extensões, obtidas em cada um dos picos e a robustez.

Tabela 20. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

Provete	Pico 1			Pico2		
	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	U (kN/m)	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	U (kN/m)
Provete 1	7,40	5,24	24,98	9,10	52,36	306,98
Provete 2	8,94	5,00	28,07	9,87	53,45	337,30
Provete 3	6,86	3,28	14,60	7,06	45,34	231,99
Provete 4	6,93	1,87	8,37	11,51	57,07	443,99
Provete 5	7,24	4,19	21,61	8,98	52,76	333,32
Valor médio	7,48	3,91	19,53	9,30	52,20	330,72
Desvio padrão	0,85	1,38	8,00	1,61	4,26	76,14
C. Variação (%)	11,35	35,15	40,95	17,30	8,16	23,02

Em termos de resistência à tracção, o valor médio correspondente ao “pico 1” ($T_{\max}=7,48\text{kN/m}$) é ligeiramente inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{\max}=9,30\text{kN/m}$) cujos coeficientes de variação são 11,35% e 17,30% para o “pico 1” e “pico 2”, respectivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é de 3,91% (C.V.=35,15%) que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 52,20% (C.V.=8,16%).

Os valores da robustez também apresentam um contraste acentuado em que o “pico 1” apresenta um valor de 19,53kN/m (C.V.=40,95%) e o “pico 2” um valor de 330,72kN/m (C.V.=23,02%).

De modo análogo ao sucedido para as amostras submetidas apenas à abrasão, também aqui, pelas mesmas razões, apenas se podem considerar os valores alusivos ao “pico 1”. Deste modo, na Tabela 21, apresentam-se os valores correspondentes ao “pico 1” e na Figura 56 apresentam-se as curvas força-extensão e a correspondente curva média.

Tabela 21. Resultados do ensaio de tracção do geocompósito após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão (apenas o “pico 1”).

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	7,40	5,24	229,35	146,71	----- (*)	141,35	24,98
Provete 2	8,94	5,00	254,75	178,80	----- (*)	178,80	28,07
Provete 3	6,86	3,28	267,62	108,77	----- (*)	205,90	14,60
Provete 4	6,93	1,87	344,37	95,39	----- (*)	369,81	8,37
Provete 5	7,24	4,19	263,91	127,29	----- (*)	173,00	21,61
Valor médio	7,48	3,91	272,00	131,39	----- (*)	213,77	19,53
Desvio padrão	0,85	1,38	43,13	32,81	----- (*)	90,19	8,00
C. Variação (%)	11,35	35,15	15,86	24,97	----- (*)	42,19	40,95

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

Da Tabela 21, verifica-se que o valor médio da resistência à tracção é de 7,48kN/m sendo este valor inferior ao valor dos provetes intactos 51,54kN/m. A extensão na rotura apresenta um valor médio de 3,91%. Para as grandezas apresentadas anteriormente, resistência à tracção e extensão na rotura, os coeficientes de variação são, respectivamente, de 11,35% e de 35,15%.

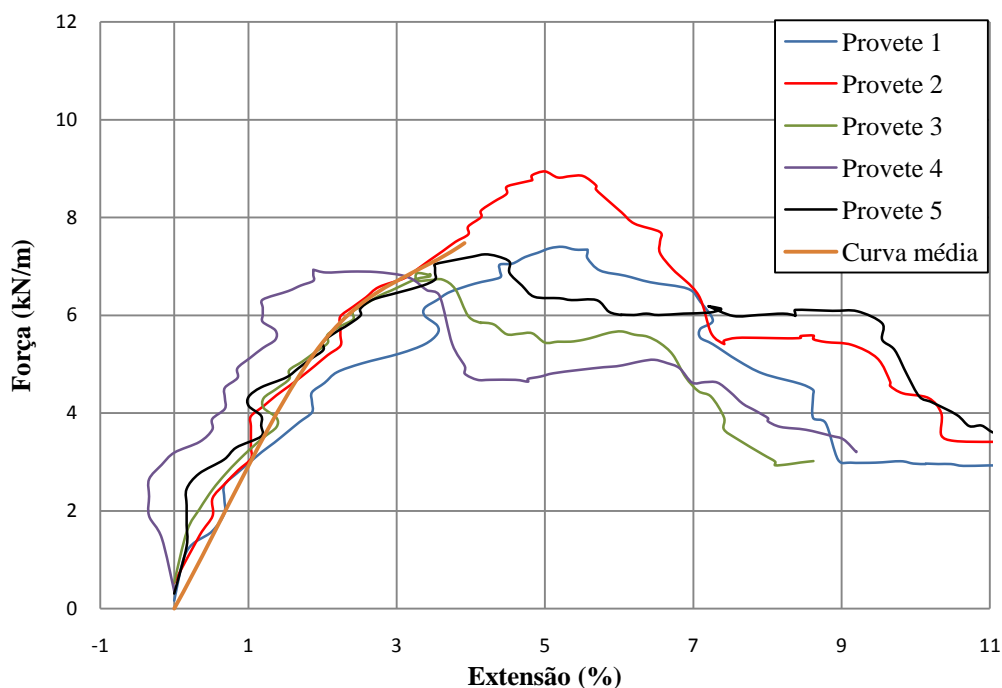


Figura 56. Curvas força-extensão dos provetes do geocompósito (GCR) após DDI e abrasão e respectiva curva média (apenas o “pico1”).

A rigidez secante apresenta um valor médio de 272,0kN/m (C.V.=15,86%) e 131,39kN/m (C.V.=24,97%) para as extensões de 2% e 5%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 19,53kN/m apresentando um coeficiente de variação de 40,95%.

Na Figura 56 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento um pouco controverso, no entanto, regra geral, apresentam a mesma orientação. Uma das curvas apresenta extensões negativas o que reflecte que aquando do início do ensaio o provete apresentava algumas “folgas”.

3.4.3. Geogrelha tecida (GGR-T)

3.4.3.1. Provetes intactos

Os ensaios de tracção enunciados seguiram os procedimentos e as especificações para este material enunciados na secção 3.3.1. Para a medição das extensões usaram-se os alvos que se encontram na Figura 57 cuja fixação foi efectuada do modo se encontra explicitado na Figura 57c.

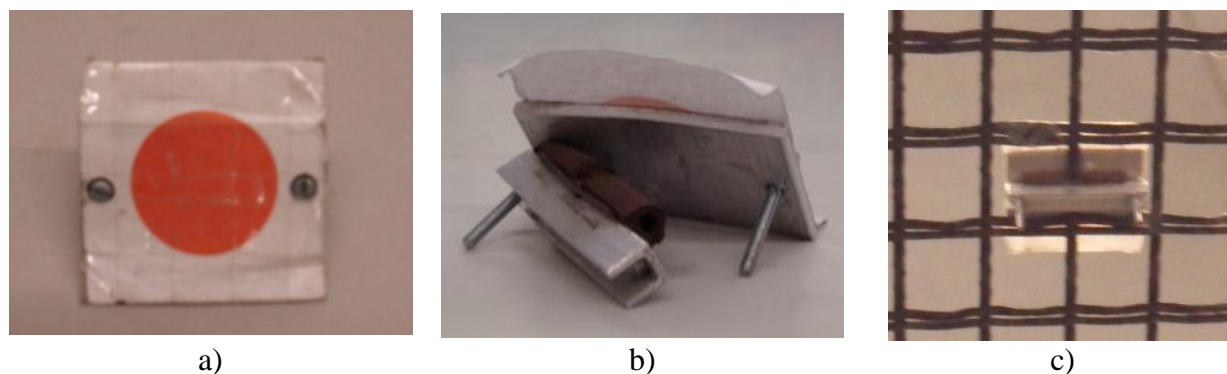


Figura 57. Alvos utilizados na medição da extensão: a) vista frontal; b) vista posterior; c) modo de fixação dos alvos.

Na Tabela 22 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de tracção da geogrelha, em provetes compostos por 9 barras numa largura de 200mm. Relativamente ao comprimento dos provetes este foi estabelecido pelo número de barras entre garras, que para o presente ensaio optou-se por usar 9 barras que auferem um comprimento de cerca de 250mm entre as pegas.

Na Figura 58 apresentam-se as curvas força-extensão dos provetes ensaiados e a correspondente curva média.

Tabela 22. Resultados do ensaio de tracção dos provetes intactos da geogrelha.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	44,25	8,90	440,68	350,62	----- (*)	438,28	160,20
Proвете 2	45,43	7,79	506,20	439,10	----- (*)	407,40	148,11
Proвете 3	44,01	7,93	488,47	410,78	----- (*)	483,28	150,89
Proвете 4	43,57	7,85	459,84	388,69	----- (*)	540,69	141,26
Proвете 5	44,68	7,67	433,24	394,89	----- (*)	233,04	134,38
Valor médio	44,39	8,03	465,69	396,82	----- (*)	420,54	146,97
Desvio padrão	0,71	0,50	31,12	32,35	----- (*)	116,21	9,78
C. Variação (%)	1,60	6,20	6,68	8,15	----- (*)	27,63	6,66

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

Na Tabela 22, verifica-se que o valor médio da resistência à tracção é de 44,39kN/m sendo este valor inferior ao valor apresentado pelo fabricante (55kN/m), tal facto, porventura, estará relacionado com as deformações que ocorreram nas pegas utilizadas na realização destes ensaios (Figura 59). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 8,03% que é ligeiramente inferior ao valor disponibilizado pelo fabricante (10,5%). Para as grandezas apresentadas anteriormente, resistência à tracção e extensão na rotura, os coeficientes de variação são, respectivamente, de 1,60% e de 6,20%.

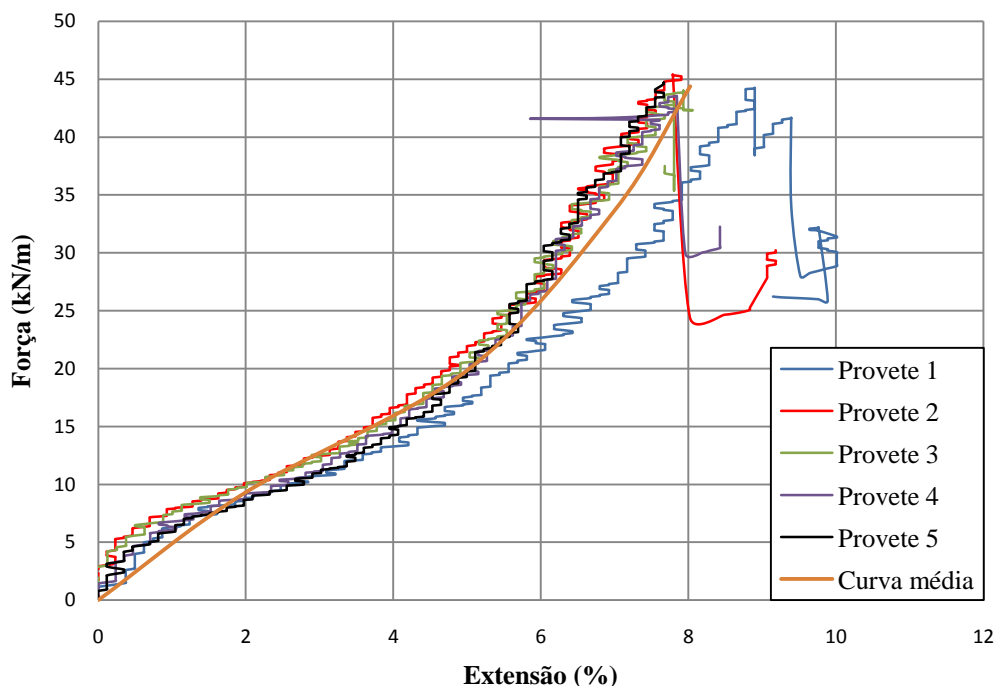


Figura 58. Curvas força-extensão dos provetes intactos da geogrelha e respectiva curva média.

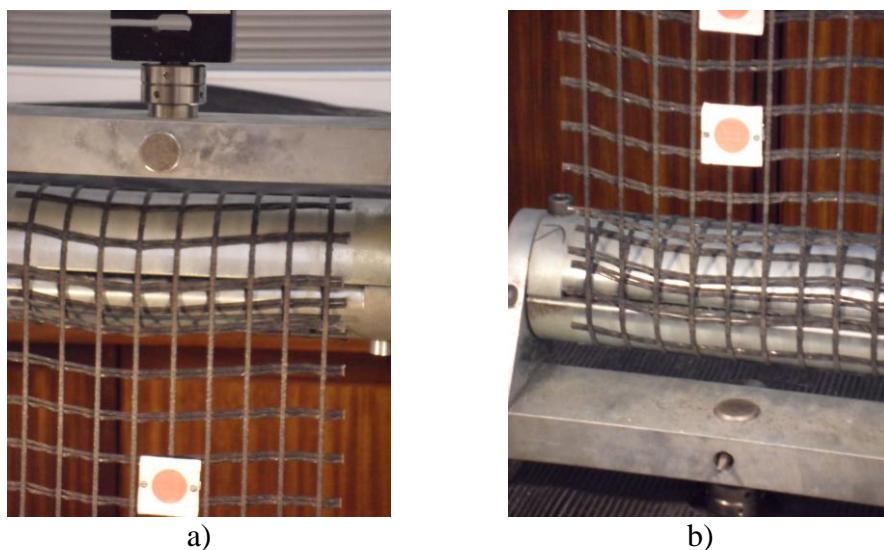


Figura 59. Deformação ocorrida nas peças: a) peça superior; b) peça inferior.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 465,69kN/m e 396,82kN/m e os coeficientes de variação associados são 6,68% e 8,15% para $J_{\text{sec}(2\%)}$ e $J_{\text{sec}(5\%)}$, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 146,97kN/m e um coeficiente de variação de 6,66%.

Na Figura 58 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam o mesmo desenvolvimento, havendo a sobreposição de algumas curvas. Porém, essas curvas apresentam perturbações que evidenciam algum deslocamento dos alvos durante o ensaio, causando pequenos erros de leitura com o vídeo extensómetro. Tal acontecimento estará relacionado com o facto de, à

medida que o ensaio prossegue, as barras sofrerem um adelgaçamento, ficando os alvos com alguma folga que lhes confere alguma mobilidade.

Quanto à rotura dos provetes, esta caracteriza-se pelo desprendimento das barras longitudinais (paralelas à direcção do ensaio) face às barras transversais e pela rotura das barras longitudinais. Em termos mais localizados verificou-se a desagregação dos filamentos que constituem as barras longitudinais que, inicialmente se encontravam justapostos (Figura 60).

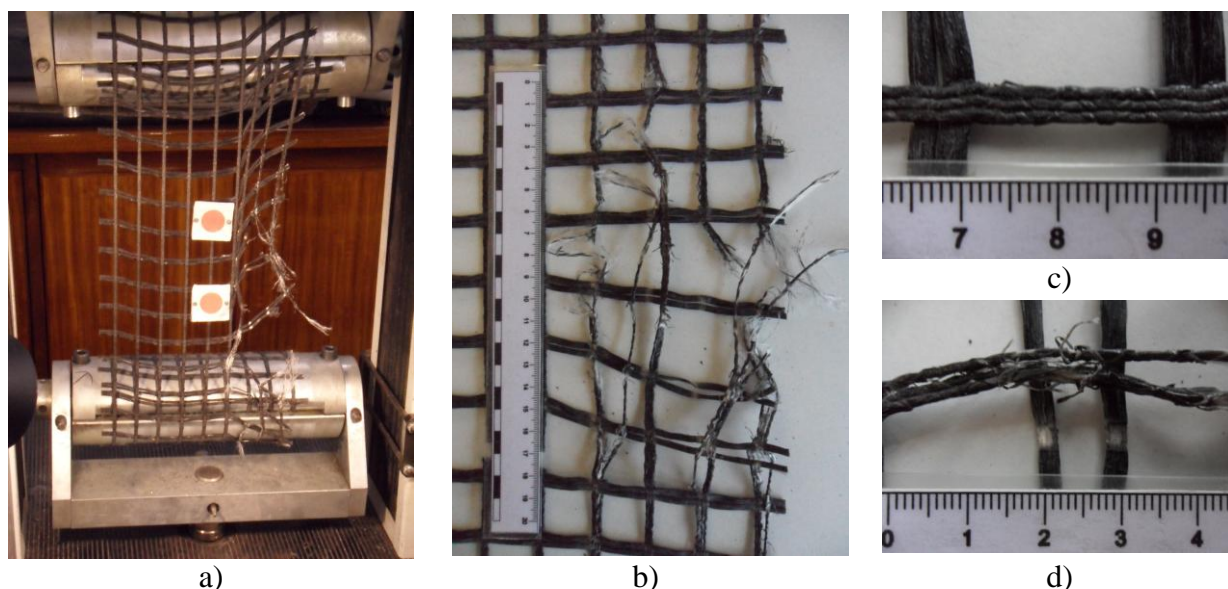


Figura 60. Modo de rotura dos provetes intactos da geogrelha: a) vista geral; b) danos ocorridos; c) aspecto pormenorizado de uma barra longitudinal antes do ensaio; d) aspecto de uma barra longitudinal após o ensaio.

3.4.3.2. Provetes submetidos à Abrasão

A abrasão induzida na geogrelha provocou o destacamento da camada superficial que reveste as fibras de poliéster, a desagregação das barras transversais e o desfiamento das barras longitudinais. No ensaio em questão teve-se o cuidado de colocar sempre a mesma face em contacto com a película abrasiva, pois, embora pareçam semelhantes, estas apresentam uma ligeira diferença entre si, tal como se pode observar na Figura 61. Deste modo, considerando a situação, porventura, mais gravosa, optou-se por expor a face que se encontra na Figura 61b em contacto com o abrasivo. Na Figura 62 é possível observar os danos manifestados, pelos provetes, após o ensaio de abrasão.

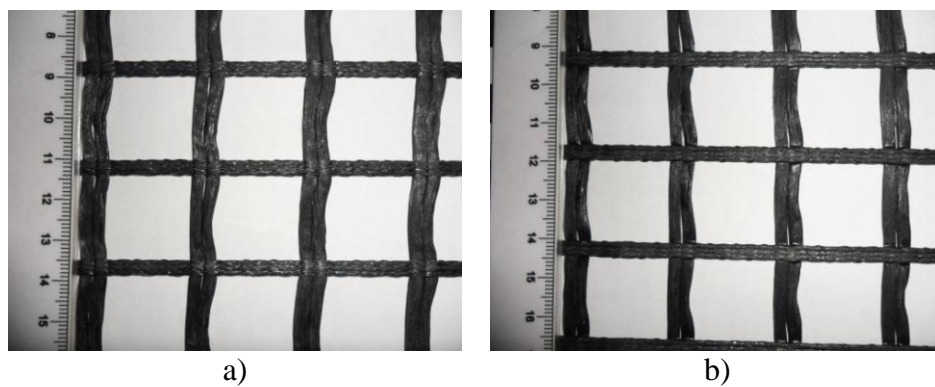


Figura 61. Faces da geogrelha.

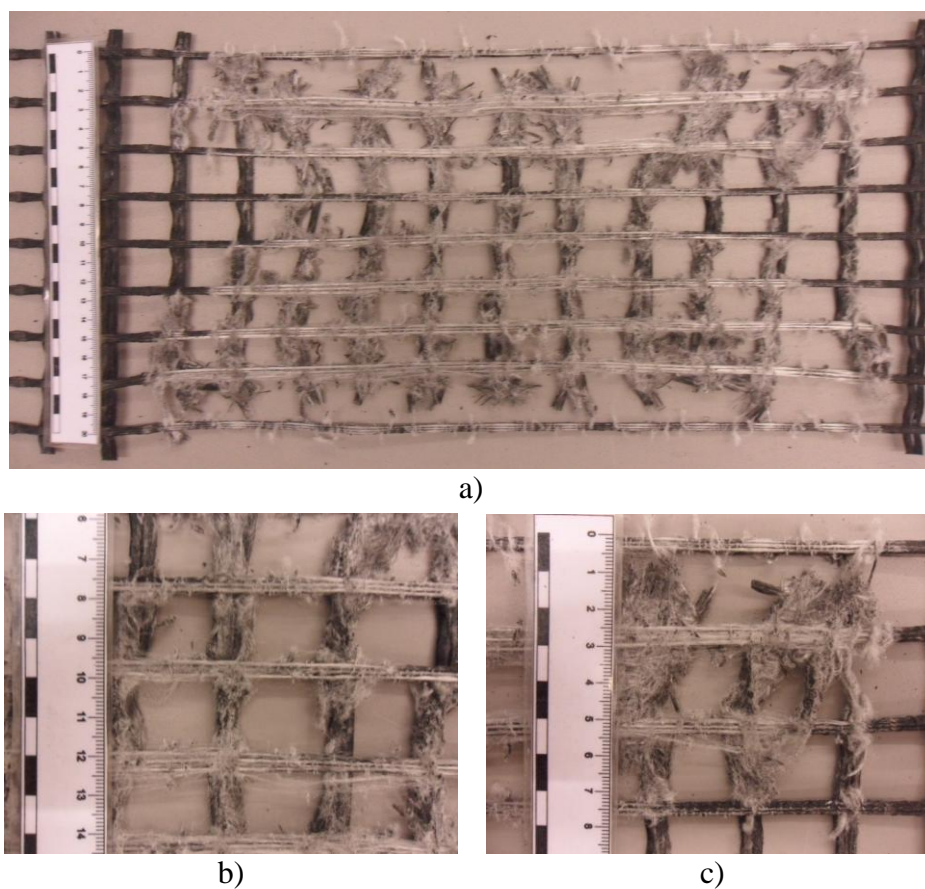


Figura 62. Danos observados nos provetes da geogrelha após abrasão: a) vista geral; b) desgaste das barras longitudinais; c) desgaste das barras transversais.

Na Tabela 23 são apresentados os valores da resistência à tracção, da extensão na rotura, dos módulos de rigidez secante para as extensões de 2%, 5% e 10% e a robustez obtidos no ensaio de tracção da geogrelha após abrasão. A Figura 63 mostra as curvas força-extensão dos provetes ensaiados e a correspondente curva média.

Tabela 23. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de abrasão.

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	10,21	7,46	272,81	178,51	----- (*)	134,06	51,23
Provete 2	13,17	4,63	268,23	248,92	----- (*)	271,95	29,07
Provete 3	8,03	9,25	164,87	141,66	----- (*)	86,82	51,21
Provete 4	12,23	10,13	177,50	162,43	121,37	120,64	75,41
Provete 5	12,13	12,55	178,83	120,18	118,97	96,71	106,70
Valor médio	11,15	8,81	212,45	170,34	120,17	142,03	62,72
Desvio padrão	2,05	2,97	53,32	49,10	1,70	75,00	29,55
C. Variação (%)	18,37	33,67	25,10	28,83	1,41	52,81	47,11

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

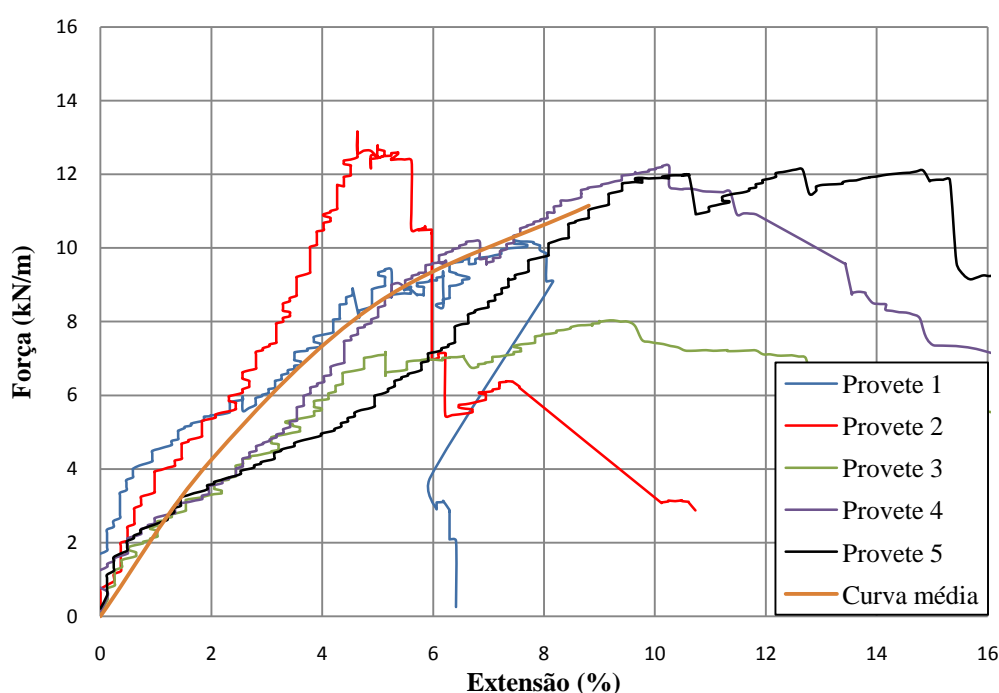


Figura 63. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após abrasão e respectiva curva média.

O valor médio da resistência à tracção é de 11,15kN/m reflectindo uma elevada redução (de 74,88%) da resistência relativamente aos provetes intactos (44,39kN/m), tendo associado um coeficiente de variação de 18,37%. A extensão na rotura adopta um valor médio de 8,81%, que é superior ao valor apresentado pela amostra intacta, com um coeficiente de variação de 33,67%.

A rigidez secante apresenta um valor inferior ao manifestado pelas amostras intactas sendo de 212,45kN/m (C.V.=25,10%), 170,34kN/m (C.V.=28,83%) e 120,17kN/m (C.V.=1,41%) para as extensões de 2%, 5% e 10%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 62,72kN/m apresentando um coeficiente de variação de 47,11%, este valor elevado do coeficiente de variação

reflete a diversidade observada na agressividade dos danos induzidos, no ensaio de abrasão, aos provetes.

As curvas força-extensão dos provetes apresentam alguma heterogeneidade que se traduz nos elevados coeficientes de variação obtidos, tal heterogeneidade está associada ao carácter aleatório dos danos induzidos na geogrelha durante o ensaio de abrasão. À semelhança do que ocorreu na amostra intacta, também aqui as curvas força-extensão apresentam perturbações que evidenciam a existência de deslocamento dos alvos durante o ensaio. A rotura dos provetes manifestou-se pelo deslocamento relativo dos diversos filamentos que constituem as barras não sendo, portanto, uma rotura bem definida (Figura 64).

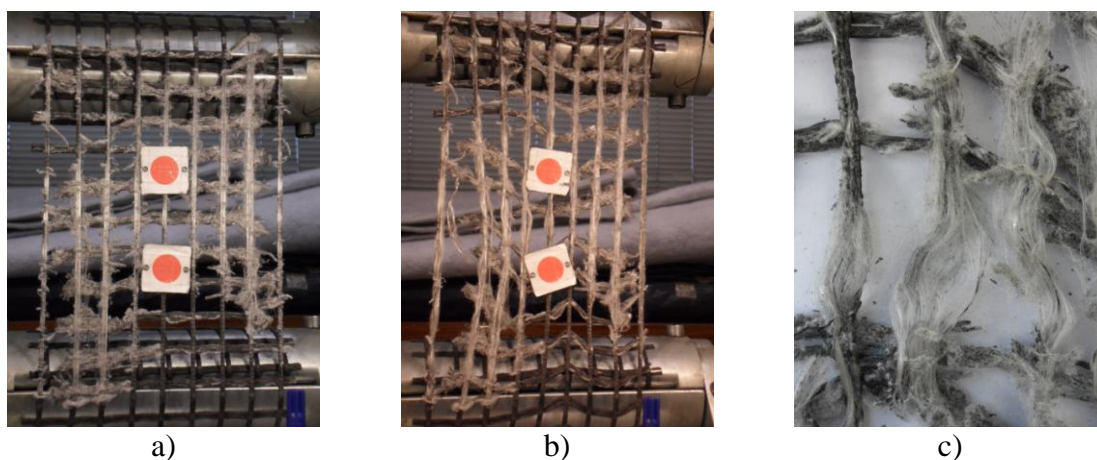


Figura 64. Comportamento à tracção dos provetes da geogrelha após abrasão: a) provete antes do ensaio; b) rotura do provete (vista geral); c) modo de rotura das barras longitudinais.

3.4.3.3. Provetes de referência para a DDI

A danificação induzida provocou danos severos que se manifestam maioritariamente por abrasão superficial, rotura total e parcial de algumas barras e esmagamento/adelgaçamento de algumas barras (Figura 65).

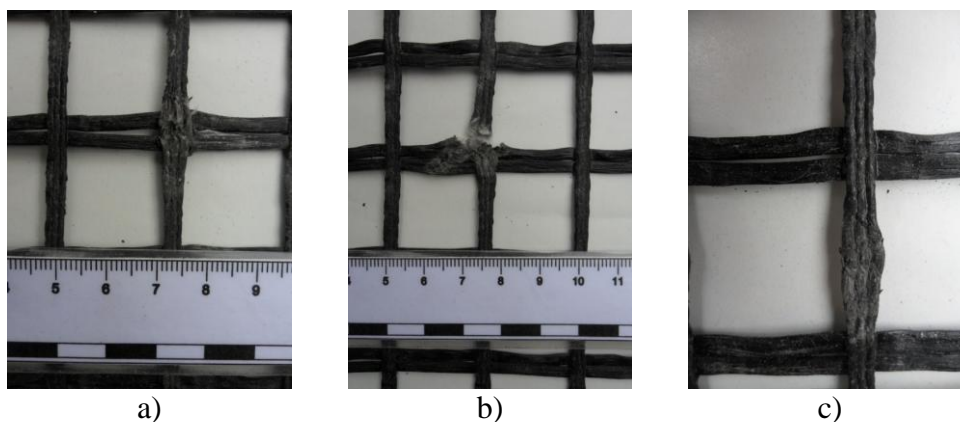


Figura 65. Danos induzidos nos provetes da geogrelha: a) abrasão superficial; b) corte total e parcial das barras; c) esmagamento das barras.

Os resultados dos ensaios de tracção da geogrelha, após a realização dos ensaios de referência para a DDI, encontram-se na Tabela 24 e as curvas força-extensão dos provetes e a curva média encontram-se na Figura 66.

Tabela 24. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	34,52	8,49	379,63	362,97	----- (*)	362,23	141,90
Proвете 2	34,49	8,04	424,98	377,64	----- (*)	336,14	131,97
Proвете 3	29,13	7,38	426,44	330,39	----- (*)	390,29	102,09
Proвете 4	38,30	7,83	382,02	352,81	----- (*)	489,04	122,36
Proвете 5	27,35	7,51	455,94	414,16	----- (*)	364,40	114,81
Valor médio	32,76	7,85	413,80	367,60	----- (*)	388,42	122,63
Desvio padrão	4,45	0,44	32,55	31,20	----- (*)	59,42	15,34
C. Variação (%)	13,58	5,66	7,87	8,49	----- (*)	15,30	12,51

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

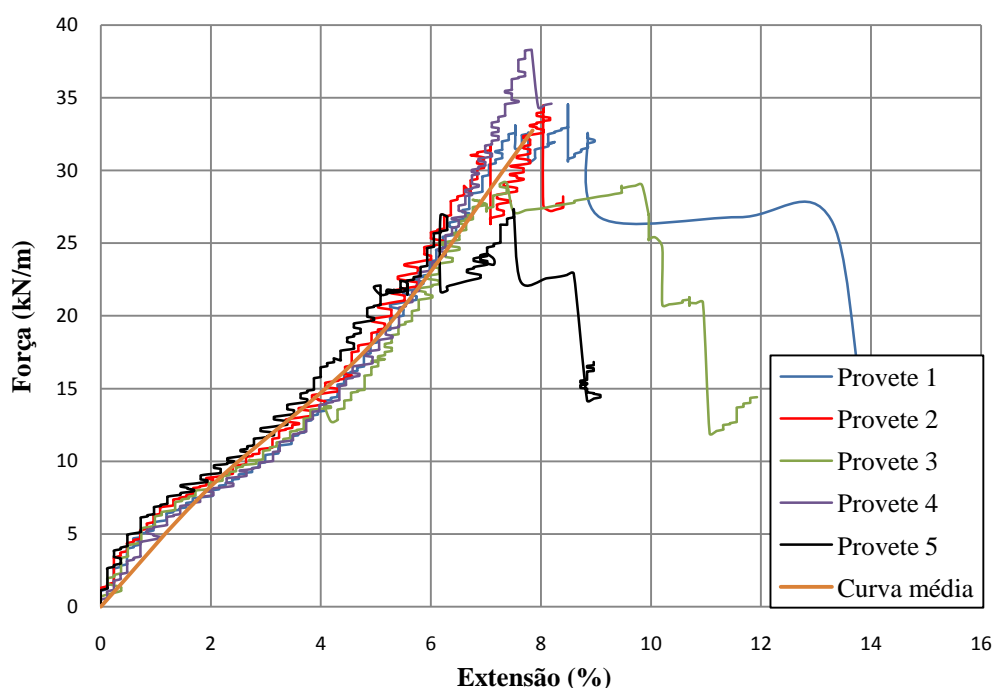


Figura 66. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após ensaios de referência para a DDI.

O valor médio da resistência à tracção sofreu uma redução de 26,20%, face aos provetes intactos, fixando-se no valor de 32,76kN/m e apresenta um coeficiente de variação de 13,58%. A extensão na rotura apresenta um valor médio de 7,85% com um coeficiente de variação de 5,66%.

O módulo de rigidez secante apresenta um valor inferior ao manifestado pelas amostras intactas sendo de 413,80kN/m (C.V.=7,87%) e 367,60kN/m (C.V.=8,49%) para as extensões de 2% e 5%, respectivamente. A robustez apresenta um valor médio, ligeiramente inferior ao das amostras intactas, de 122,63kN/m apresentando um coeficiente de variação de 12,51%.

Da Figura 66 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento heterogéneo que se reflecte nos elevados coeficientes de variação das grandezas apresentadas na Tabela 24. Esta heterogeneidade está relacionada com a diversidade de danos com carácter aleatório, que foram induzidos aos provetes pelas partículas de balastro. Também aqui as curvas força-extensão apresentam perturbações que evidenciam a existência de deslocamento dos alvos durante o ensaio.

3.4.3.4. Provetes submetidos à DDI

A danificação induzida provocou danos que se manifestam pela abrasão superficial, rotura parcial de algumas barras e esmagamento/adelgaçamento de algumas barras (Figura 67). É de referir que no ensaio de DDI os danos manifestados encontram-se dispersos por todo o provete e são menos severos que os provetes de referência.

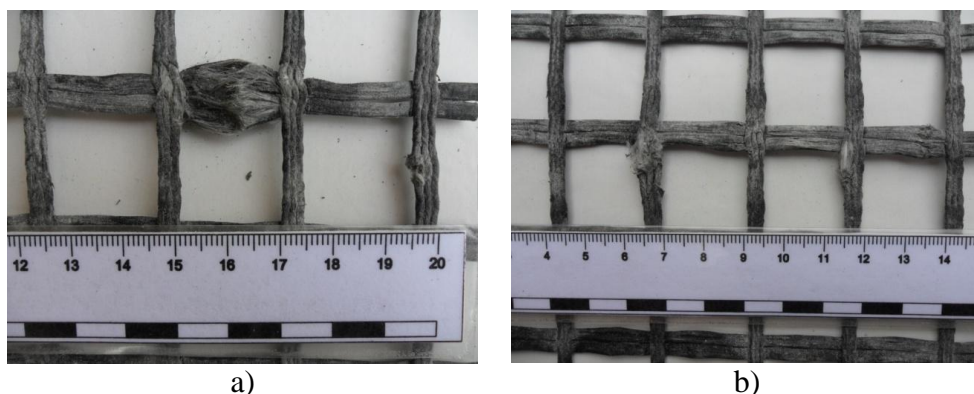


Figura 67. Danos induzidos nos provetes da geogrelha: a) abrasão superficial; b) corte total e parcial das barras; c) esmagamento das barras.

Os resultados dos ensaios de tracção da geogrelha, após a realização dos ensaios de DDI, encontram-se na Tabela 25 e as respectivas curvas força-extensão e a curva média encontram-se na Figura 68.

Tabela 25. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após os ensaios de DDI.

Provete	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Provete 1	26,71	6,24	435,34	399,63	----- (*)	123,09	79,84
Provete 2	20,59	6,61	398,03	340,53	----- (*)	268,44	75,06
Provete 3	24,68	9,78	331,11	272,04	----- (*)	252,44	131,29
Provete 4	29,83	7,84	423,54	404,40	----- (*)	374,75	125,63
Provete 5	24,05	6,52	367,45	299,21	----- (*)	289,05	71,24
Valor médio	25,17	7,40	391,10	343,16	----- (*)	261,56	96,61
Desvio padrão	3,41	1,47	42,47	59,03	----- (*)	90,65	29,30
C. Variação (%)	13,56	19,81	10,86	17,20	----- (*)	34,66	30,33

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

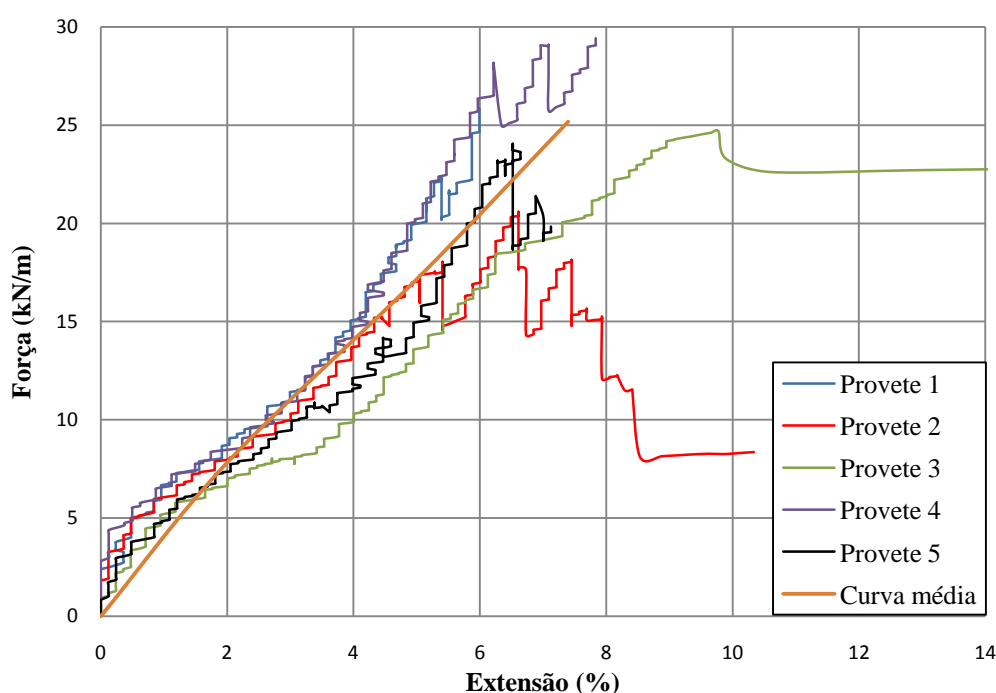


Figura 68. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após ensaios de DDI.

O valor médio da resistência à tracção sofreu uma redução de 23,17%, face aos provetes de referência, fixando-se no valor de 25,17kN/m e apresenta um coeficiente de variação de 13,56%. A extensão na rotura apresenta um valor médio, ligeiramente superior ao valor apresentado pelos provetes de referência, 7,40% com um coeficiente de variação de 19,81%.

O módulo de rigidez secante apresenta um valor inferior ao manifestado pelas amostras de referência sendo de 391,10kN/m (C.V.=10,86%) e 343,16kN/m (C.V.=17,20%) para as extensões de 2% e 5% respectivamente. A robustez apresenta um valor médio, inferior ao das amostras de referência, 96,61kN/m apresentando um coeficiente de variação de 30,33%.

As curvas força-extensão dos provetes apresentam alguma heterogeneidade que se evidencia pelos elevados coeficientes de variação obtidos. À semelhança do que tem ocorrido com as restantes amostras, também aqui as curvas força-extensão apresentam perturbações que evidenciam a existência de deslocamento dos alvos durante o ensaio.

3.4.3.5. Provetes submetidos à DDI + Abrasão

Após os ensaios de abrasão, nos provetes submetidos a DDI, observaram-se as mesmas anomalias que no ensaio de abrasão dos provetes intactos (destacamento da camada superficial que reveste as fibras de poliéster, a desagregação das barras transversais e o desfiamento das barras longitudinais) embora com mais agressividade.

Na Tabela 26 são apresentados os valores da resistência à tracção, da extensão na rotura, dos módulos de rigidez secante para as extensões de 2% e 5% e a robustez obtidos no ensaio de tracção da geogrelha após DDI e abrasão. A Figura 69 mostra as curvas força-extensão dos provetes ensaiados e a correspondente curva média.

Tabela 26. Resultados do ensaio de tracção da geogrelha após a realização dos ensaios de DDI e de abrasão.

Proвете	T_{\max} (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	$J_{\text{sec}} (2\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (5\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (10\%)$ (kN/m)	$J_{\text{sec}} (\epsilon_{\max})$ (kN/m)	U (kN/m)
Proвете 1	8,35	3,20	178,50	22,17	----- (*)	254,73	10,96
Proвете 2	5,76	5,08	116,63	114,83	----- (*)	112,08	16,69
Proвете 3	4,95	6,50	140,17	92,57	----- (*)	76,09	22,62
Proвете 4	4,78	2,37	168,69	30,99	----- (*)	196,57	4,81
Proвете 5	5,85	7,97	87,64	82,40	----- (*)	73,39	27,98
Valor médio	5,94	5,03	138,33	68,59	----- (*)	142,57	16,61
Desvio padrão	1,43	2,31	37,35	40,23	----- (*)	80,05	9,17
C. Variação (%)	24,04	45,88	27,00	58,64	----- (*)	56,15	55,23

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

Da Tabela 26, verifica-se que o valor médio da resistência à tracção é de 5,94kN/m sendo este valor inferior ao valor dos provetes intactos (44,39N/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 5,03%. Para estas grandezas os coeficientes de variação são, respectivamente, de 24,04% e de 45,88%.

A rigidez secante apresenta um valor médio de 138,33kN/m (C.V.=27,0%) e 68,59kN/m (C.V.=58,64%) para as extensões de 2% e 5% respectivamente. A robustez apresenta um valor médio de 16,61kN/m apresentando um coeficiente de variação de 55,23%.

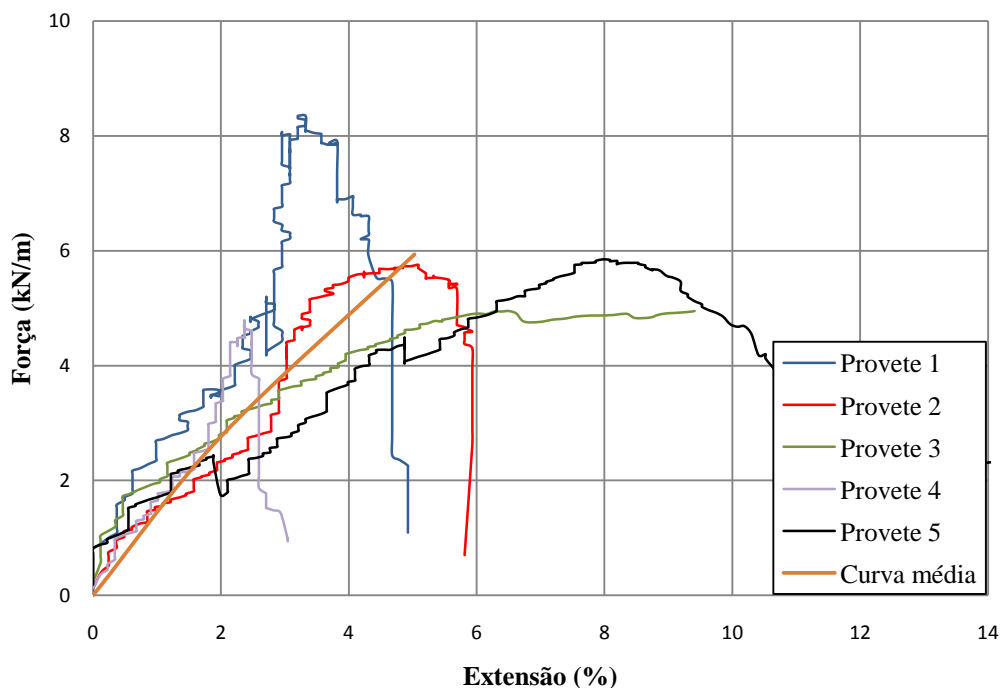


Figura 69. Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha após DDI e abrasão e respectiva curva média.

Da Figura 69 pode-se verificar que as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento muito heterogéneo que se reflecte nos elevados coeficientes de variação das grandezas apresentadas na Tabela 26. Esta heterogeneidade está relacionada com a diversidade de danos de carácter aleatório, que foram induzidos aos provetes pelas partículas de balastro e pelo ensaio de abrasão.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Discussão dos resultados

4.1.1. Geotêxtil não tecido (GTX-N)

4.1.1.1. Ensaio laboratoriais

Na Figura 70 são apresentadas as curvas força-extensão médias determinadas para as amostras de geotêxtil intactas e danificadas em laboratório.

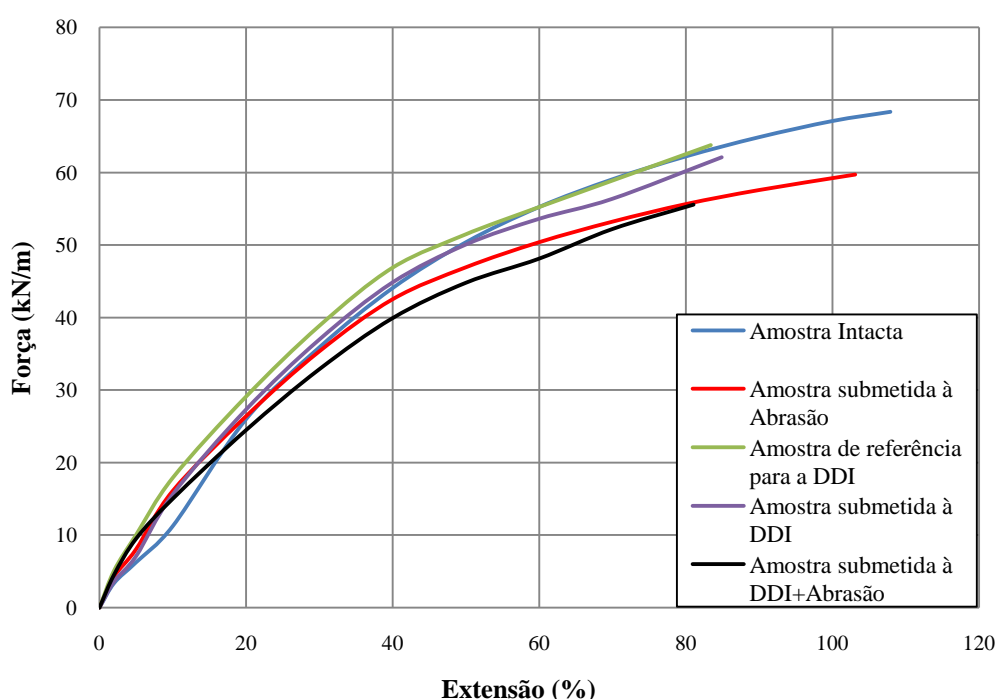


Figura 70. Representação das curvas médias força-extensão do geotêxtil: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

Após os diferentes danos induzidos, as curvas médias força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante. Ao longo de todo o traçado, as curvas apresentam pequenas diferenças, com exceção do momento da rotura que varia de ensaio para ensaio.

Deste modo, a curva da amostra intacta é a que evidencia uma maior força e extensão na rotura ao invés do que ocorre com a amostra submetida à DDI+Abrasão. Desta mesma imagem (Figura 70) pode-se verificar a existência de dois grupos de resultados em que um deles engloba as amostras intacta e submetida à abrasão, que apresentam extensões muito semelhantes embora diferentes forças de rotura (amostra intacta superior à submetida à abrasão) e um outro grupo no

qual se encontram as amostras que foram sujeitas à DDI, que mais uma vez apresentam extensões semelhantes embora diferentes forças de rotura.

As curvas médias podem não ser representativas do comportamento de provetes reais. De facto, após a rotura de um dos provetes considerados, a curva média deixa de ter significado. Para tentar ultrapassar essa limitação, e para complementar as curvas da Figura 70, na Figura 71 ilustram-se as curvas dos provetes que melhor se aproximam da curva média respectiva.

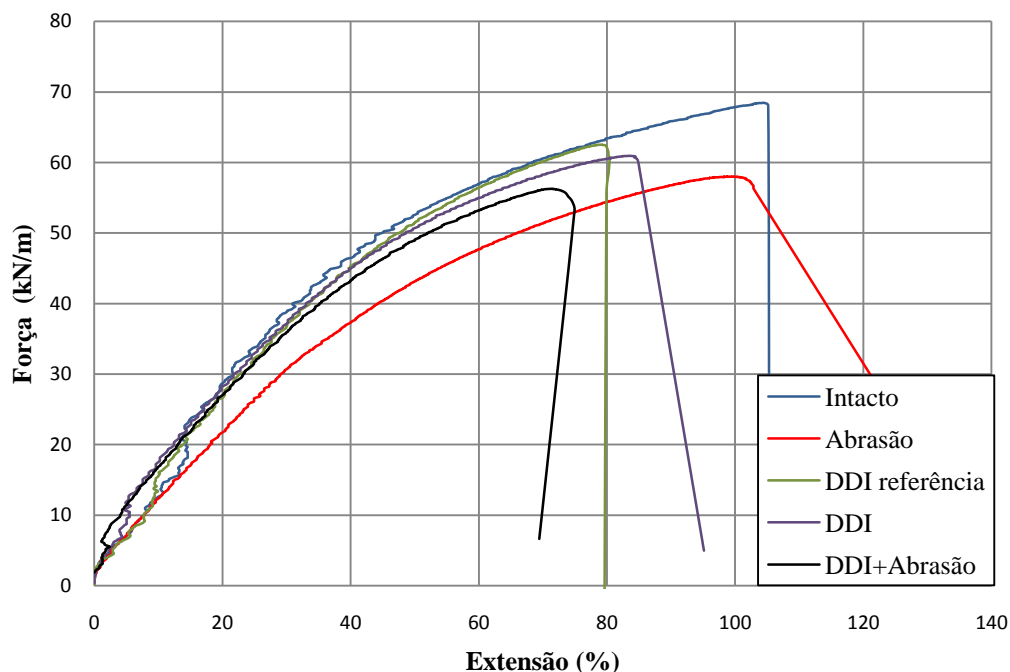
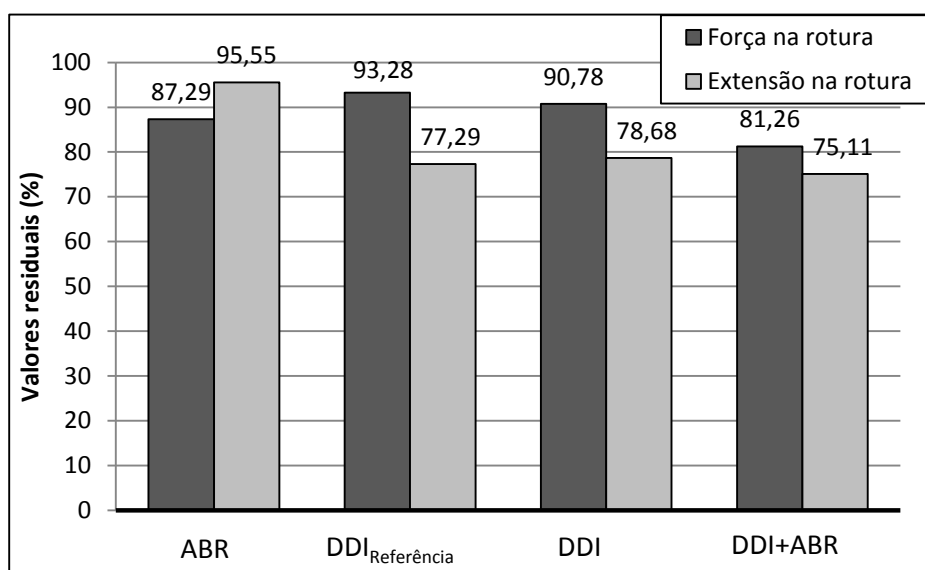


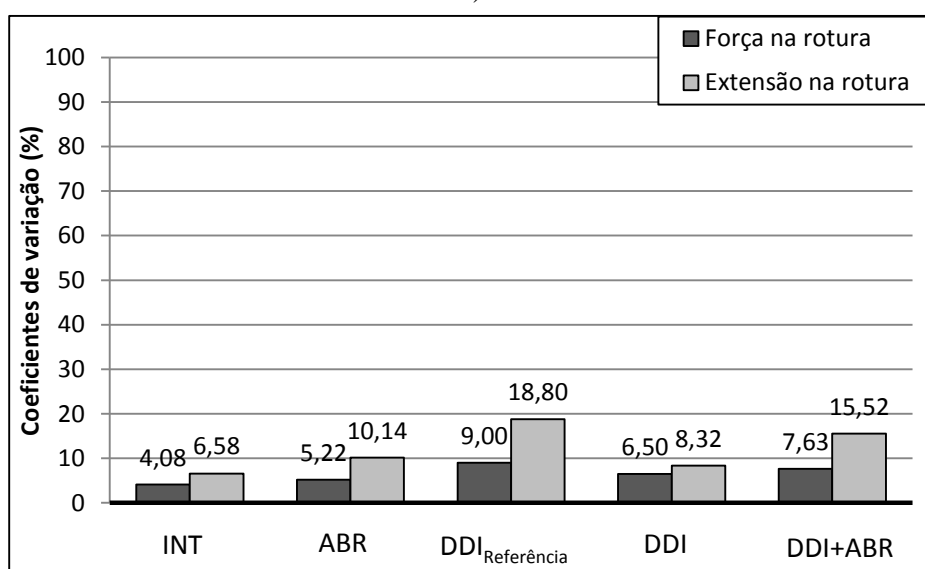
Figura 71. Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média do geotêxtil nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

Na Figura 72 apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão, do material geotêxtil utilizado no presente estudo, para as condições após abrasão, após a submissão aos ensaios de referência para a DDI, após DDI e após DDI acrescida de abrasão. Estes valores foram determinados tendo em conta os valores obtidos para as amostras intactas. A mesma figura contém ainda os coeficientes de variação afectos a estas duas grandezas para cada situação de ensaio. A determinação destes valores residuais (em percentagem), efectuou-se de acordo com a equação 1 a qual corresponde ao quociente entre o valor da resistência à tracção, da amostra que se pretende analisar, e o valor da resistência à tracção da amostra de referência.

$$V. R. = \frac{T_{Max} \text{ da amostra em análise}}{T_{Max} \text{ da amostra de referência}} \times 100 \quad (1)$$



a)



b)

Figura 72. Geotêxtil: a) valores residuais (%) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação (%).

Da Figura 72a pode-se verificar que, após os danos induzidos (Abrasão, DDI_{Referência}, DDI e combinação DDI+Abrasão), ocorreu uma perda de resistência à tracção significativa, que em alguns casos rondava os 20%, traduzindo-se em resistências residuais que oscilam entre os 81,29% e 93,28%. As perdas mais significativas ocorreram nas amostras que foram submetidas à combinação da DDI com a abrasão (18,74%), seguida das amostras submetidas apenas à abrasão (12,71%). Ou seja, da análise da Figura 72a, pode-se concluir que o factor preponderante na redução da resistência à tracção do presente material é a abrasão, pois este fenómeno provocou danos que se manifestaram pela desagregação superficial dos filamentos originando a redução da espessura do material ensaiado. Porém, nas DDI's, o contacto com as partículas de balastro, apenas originaram

contusões, que se traduzem em adelgaçamentos pontuais da espessura do material geotêxtil, acompanhadas de algum desgaste superficial, reflectindo-se numa reduzida perda de resistência à tracção.

Relativamente às extensões residuais, estas apresentam valores muito semelhantes com excepção das amostras submetidas apenas à abrasão que apresentam uma extensão residual de 95,55%. A abrasão induz danos estruturais significativos pelo que, durante o ensaio de tracção a mobilização da resistência do material surge para valores de extensão mais elevados. No entanto, quando combinada com a DDI, os danos da abrasão são, de certo modo atenuados pela reorientação preferencial dos filamentos anteriormente fragilizados pela DDI. Ou seja, quando submetidos à abrasão, os filamentos reorientam-se e enrolam-se, tal como se pode verificar na Figura 73, constituindo, estes aglomerados de filamentos, uma camada exterior que protege o interior do geotêxtil, evitando a propagação de tal fenómeno. De um modo geral, pode-se afirmar que quanto maior for a redução da espessura do material, maior é a sua extensibilidade, que resulta da perda de rigidez do material.

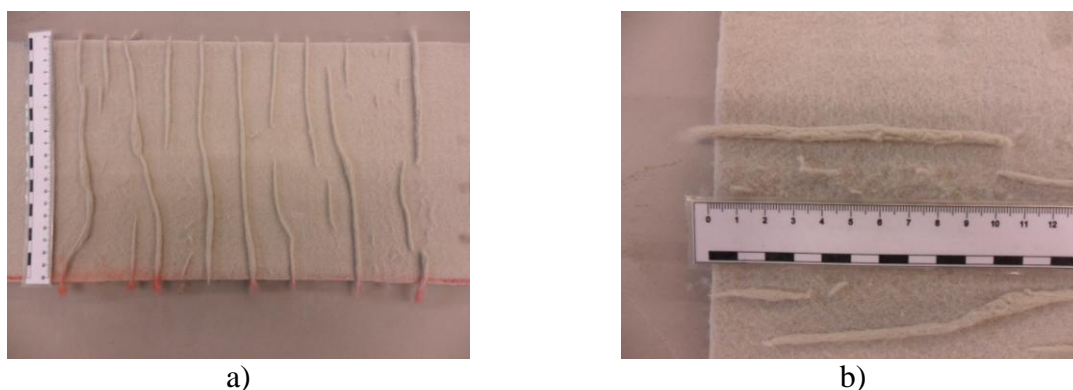


Figura 73. Danos provocados pela abrasão nos provetes de geotêxtil após DDI: a) vista geral; b) pormenor da reorientação dos filamentos.

Os coeficientes de variação para a resistência à tracção são relativamente baixos: o coeficiente mais elevado foi obtido para as amostras submetidas ao ensaio de referência da DDI (9,00%). No caso dos coeficientes de variação referentes à extensão para a força máxima, a dispersão dos resultados das amostras após os danos simulados é elevada e, portanto, os coeficientes obtidos são elevados sendo o valor mais elevado de 18,80%.

Porém, a norma EN ISO 10722:2007 especifica que os resultados das amostras submetida à DDI devem ser comparados não com as amostras intactas mas sim com as amostras, que no presente trabalho se definem como sendo as amostras de referência para a DDI, as quais derivam da indução de um certo nível de dano nas amostras intactas. Deste modo, na Figura 74, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão na rotura relativamente às amostras intactas e às amostras de referência.

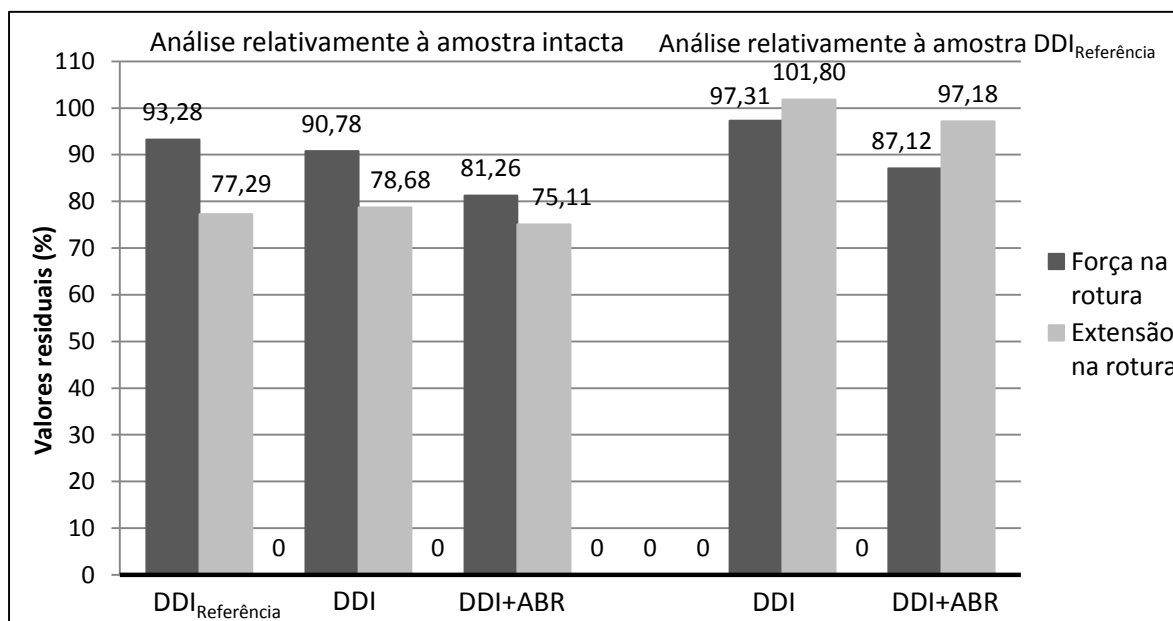


Figura 74. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão do GTX.

Da Figura 74 pode-se verificar que os valores residuais, quer da resistência à tracção quer da extensão, são menos pejorativos quando tal comparação é efectuada relativamente às amostras de referência, de onde se pode concluir que da comparação com a amostra intacta surgem valores mais conservativas do que os da comparação com a amostra de referência.

Na Figura 75 são apresentados os valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geotêxtil intacto.

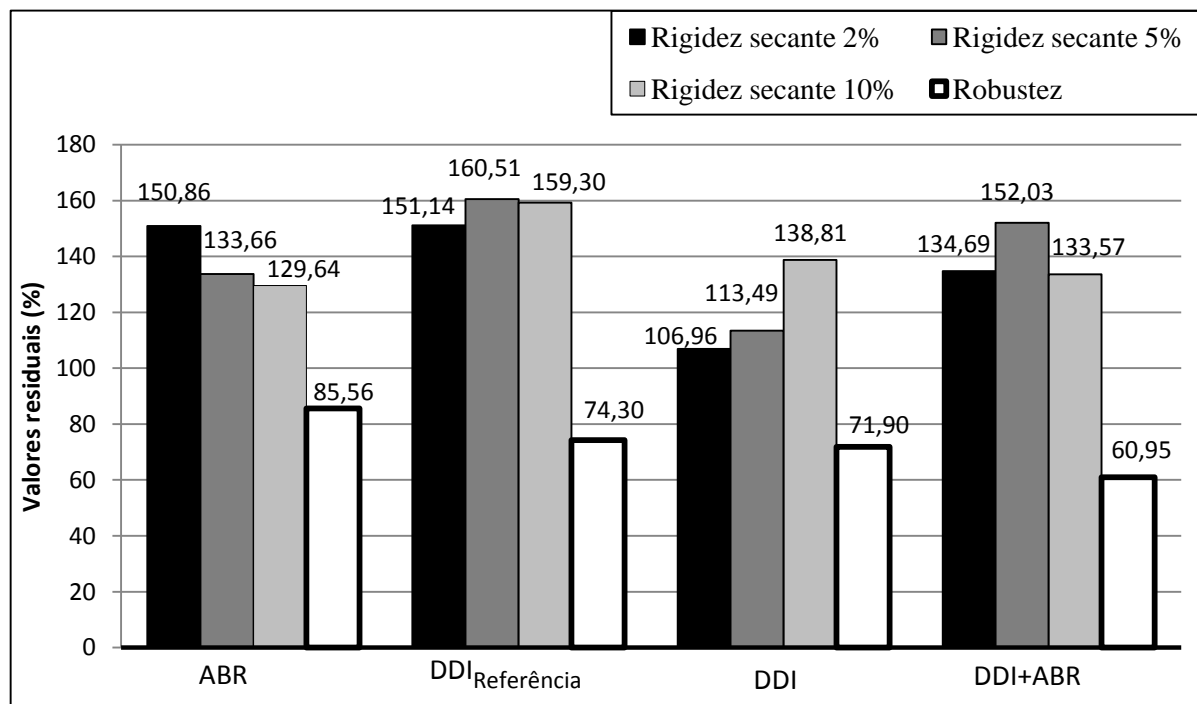


Figura 75. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geotêxtil intacto.

A rigidez das amostras, para as três extensões apresentadas, evidencia aumentos significativos face aos valores homólogos da amostra intacta. O menor aumento dos valores residuais do módulo rigidez secante ocorreu nas amostras após DDI, que apresentam um acréscimo de 6,96%, 13,49% e 38,81% para as extensões de 2%, 5% e 10%, respectivamente. Após abrasão, os acréscimos são de 50,86% para $\varepsilon=2\%$, 33,66% para $\varepsilon=5\%$ e 29,64% para $\varepsilon=10\%$. Após DDI_{Referência} são de 51,14%, 60,51% e 59,30% para $\varepsilon=2\%$, $\varepsilon=5\%$ e $\varepsilon=10\%$, respectivamente. Após DDI e Abrasão são de 34,69%, 52,03% e 33,57% para $\varepsilon=2\%$, $\varepsilon=5\%$ e $\varepsilon=10\%$, respectivamente.

Quanto à robustez das amostras verificam-se reduções graduais cujo valor residual mais elevado pertence à amostra submetida à abrasão (85,56%) e o mais baixo ocorre nas amostras submetidas à DDI e abrasão (60,95%). Este decréscimo de robustez reflecte a redução dos valores de pico (resistência à tracção e extensão na rotura) e do módulo de rigidez do material.

Os coeficientes de redução determinados para o geotêxtil, após os diferentes tipos de danos simulados, encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27. Coeficientes de redução do geotêxtil GTX-N.

CR _{ABR}	CR _{DDI}		CR _{DDI+ABR}	CR _{DDI} x CR _{ABR}	
1,15	1,10 ^(*)	1,03 ^(**)	1,23	1,26 ^(*)	1,18 ^(**)

(*) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes intactos

(**) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes de referência da DDI

Os coeficientes de redução obtidos são razoáveis. Nesta tabela também se apresentam os valores dos coeficientes de redução para a DDI relativamente às amostras intactas e às amostras de referência de onde se pode verificar que o coeficiente de redução é mais elevado se a análise for efectuada relativamente à amostra intacta.

Pela análise da Tabela 27 verifica-se que a acção combinada da DDI e abrasão (CR_{DDI+ABR}), em que os provetes do GTX foram submetidos a estes fenómenos sequencialmente, conduz a um coeficiente de redução aproximadamente igual ao coeficiente obtido considerando a sobreposição dos fenómenos (CR_{DDI} x CR_{ABR}). Tradicionalmente, esta sobreposição de efeitos é considerada através do produto dos coeficientes de redução para cada um dos mecanismos isolado. Como se verifica, caso a referência seja o comportamento das amostras intactas, o coeficiente de redução (1,26) é semelhante ao obtido combinando os efeitos de DDI+ABR (1,23), o que significa que a sinergia entre estes não é significativa. Caso se considerem os valores após a DDI de referência os resultados obtidos pela sobreposição dos efeitos são claramente menos conservativos e contra a segurança (1,18).

4.1.1.2. Comparação com materiais utilizados noutros estudos

Na presente secção é efectuado um enquadramento do material geotêxtil utilizado no presente estudo laboratorial face aos materiais similares utilizados nos trabalhos desenvolvidos por Rosete (2010) e por Pinto (2005).

Pinto (2005) utilizou dois geotêxteis não tecidos com diferentes m.u.a.: um geotêxtil com baixa resistência à tracção, com elevada extensão na rotura e com uma m.u.a. de 285g/m^2 , o qual lhe atribuiu a designação de GTX2; um geotêxtil com elevada resistência à tracção, com reduzida extensão na rotura e com uma m.u.a. de 700g/m^2 , o qual lhe atribuiu a designação de GTX1. O mesmo autor realizou os ensaios de DDI com balastro (com dimensões entre os 31,5 e os 63mm e com uma resistência à abrasão obtida no ensaio de Los Angeles de 16,9%). Para este ensaio, Pinto (2005), seguiu as indicações da norma EN ISO 10722-1:1997 com uma tensão máxima aplicada de 900kPa.

Por outro lado, Rosete (2010) utilizou um geotêxtil não tecido em polipropileno com m.u.a. de 800g/m^2 , que aqui se designa por GTX3. Esta autora para realizar os ensaios de DDI seguiu os procedimentos referidos na norma EN ISO 10722:2007: utilizou um agregado sintético de óxido de alumínio, com dimensões entre os 5mm e 10mm e aplicou uma tensão máxima de 500kPa.

Na Tabela 28 encontram-se as propriedades dos geotêxteis estudados pelos dois autores anteriormente enunciados, para a direcção de fabrico.

Tabela 28. Propriedades dos geotêxteis, na direcção de fabrico, estudados por Pinto (2005) e por Rosete (2010).

Propriedade	GTX1 Geotêxtil não tecido agulhado, filamento contínuo, 100% em PP com aditivo UV	GTX2 Geotêxtil não tecido agulhado, filamento contínuo, 100% em PP com aditivo UV	GTX3 Geotêxtil não tecido, 100% em PP
Massa por unidade de área (g/m^2)	700	285	800
Espessura (2kPa) (mm)	5,3	2,5	6,0
Resistência à tracção (kN/m)	42,0	21,5	45,0
Extensão para a força máxima (%)	95,0	100,0	95,0

Na Tabela 29, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção para o GTX1 e GTX2, levado a cabo por Pinto (2005), para o GTX3 ensaiado por Rosete (2010) e para o GTX-N ensaiado no âmbito do presente trabalho.

Na Figura 76, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção para as amostras após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão, dos geotêxteis em análise.

Tabela 29. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção dos últimos trabalhos desenvolvidos neste âmbito.

Tipo de amostra	Valor médio da força na rotura (kN/m)				Coef. Variação (%)			
	GTX1	GTX2	GTX3	GTX-N	GTX1	GTX2	GTX3	GTX-N
Intacta	43,98	24,45	42,34	68,38	6,25	4,13	5,18	4,08
Após abrasão	55,65	24,42	40,8	59,69	4,29	14,32	13,06	5,22
Após DDI	42,24	15,83	33,69	62,08	12,7	11,89	9,85	6,50
Após DDI+abrasão	42,26	13,72	30,42	55,57	5,21	23,23	4,76	7,63

Nota: A simulação da DDI do geotêxtil GTX3 processou-se nas condições da norma EN ISO 10722:2007, ou seja, com recurso a um agregado sintético, o *corundum*, e à aplicação de uma tensão máxima de 500kPa.

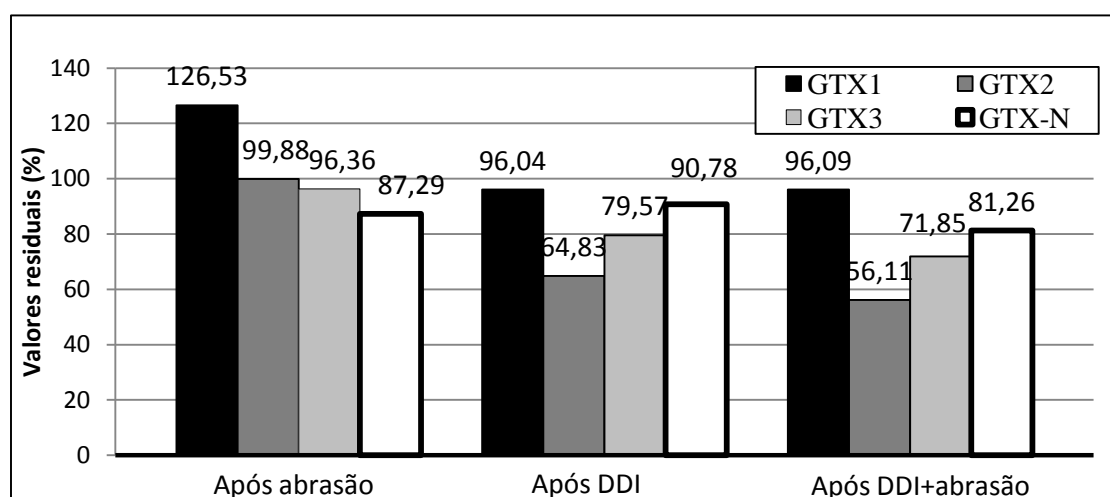


Figura 76. Valores residuais (em %) da resistência à tracção dos geotêxteis para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.

Da Tabela 29 pode-se constatar que, para as amostras intactas, o GTX-N (geotêxtil ensaiado no decorrer do presente trabalho) é o material que apresenta uma maior resistência, facto este que está relacionado com a sua elevada m.u.a. (1000g/m²).

Da Figura 75, verifica-se que após abrasão o GTX1 apresenta um aumento da sua resistência. Tal facto ocorre, segundo Pinto (2005), devido à provável reorientação de alguns filamentos e/ou ao facto de a camada superficial ser parcialmente destacada, o que provoca que alguns dos filamentos entrem em tracção somente quando já existiu alguma deformação prévia do geotêxtil. Porém, no caso do GTX2, não se verifica qualquer variação da sua resistência, o que, segundo o mesmo autor se deve ao facto de este fenómeno não ter sido simulado eficazmente em todos os provetes.

Relativamente ao geotêxtil ensaiado por Rosete (2010), GTX3, este apresenta uma redução de 3,60%, fruto da desagregação superficial parcial dos filamentos, sem que estes sofressem destacamento. Note-se que este material foi ensaiado sob condições bastante diferentes dos restantes. Relativamente ao GTX-N este apresenta uma redução de 12,70% da sua resistência.

É de referir que existem algumas diferenças nas condições de comparação entre estes materiais. Relativamente aos geotêxteis GTX1 e GTX2 estes foram submetidos ao ensaio de DDI o qual foi realizado com o mesmo material de confinamento que foi usado no caso do GTX-N. No entanto existem diferenças, claramente evidentes no que concerne à granulometria dos balastros utilizados em cada situação. Deste modo, Pinto (2005) utilizou um balastro mais grosseiro (dimensão das partículas entre 31,5mm e 63mm) comparativamente ao usado no presente trabalho (balastro de dimensão compreendida entre os 16mm e 63mm) e optou por rejeitar o material após 8 utilizações traduzindo-se num balastro com uma granulometria constante ao longo das sucessivas utilizações. Por sua vez, o geotextil GTX3 foi ensaiado com o *corundum* e para uma tensão muito inferior à utilizada nos restantes geotêxteis pelo que não é possível a sua consideração nesta análise comparativa.

No que concerne aos ensaios de abrasão estes também se processaram em condições distintas principalmente no modo como os geotêxteis foram fixados à placa estacionária. Neste âmbito, Pinto (2005) não interpôs nenhuma película abrasiva entre o geotêxtil e a placa estacionária ao invés do que acontece no GTX-N. O mesmo autor, refere que durante o ensaio do GTX2 surgiram folgas entre o provete e a placa estacionária do equipamento, aderindo o geotêxtil à película abrasiva e, consequentemente, anulou a simulação do fenómeno de abrasão.

Deste modo, atendendo ao explicitado anteriormente, apenas se considerou os resultados do GTX1 e do GTX-N para efeitos conclusivos, embora apresentem condições de comparação diferentes.

Relativamente ao GTX1 e ao GTX-N, os resultados (da abrasão) disponíveis parecem indicar que quanto maior for a massa por unidade de área (m.u.a.), maiores são as reduções da resistência à tracção dos materiais (Figura 77). Por outro lado, tal facto pode estar relacionado com a eficiência da simulação laboratorial deste fenómeno. Essa eficiência depende, porventura quer da elevada massa exibida pelo GTX-N (que implica maior rigidez e por conseguinte menores deformações, dos provetes aquando da realização do ensaio), quer da utilização da película abrasiva na fixação do provete.

Para estes dois geotêxteis, após DDI verifica-se uma tendência semelhante: quanto maior for a massa por unidade de área maior é a redução da resistência face às amostras intactas (Figura 77). Esta observação é contrária ao que diversos outros autores têm observado. Tal facto pode estar

relacionado com a flexibilidade e com a capacidade de o material geotêxtil se ajustar ao material granular utilizado no referido ensaio. No entanto, estas conjecturas apenas são possíveis devido à diferença granulométrica evidenciada pelos balastros utilizados no ensaio do GTX1 e do GTX-N. Deste modo, o balastro utilizado nos ensaios do GTX-N é menos grosseiro o que se repercute em interstícios de menor dimensão e numa maior área de contacto entre o balastro e o GTX-N.

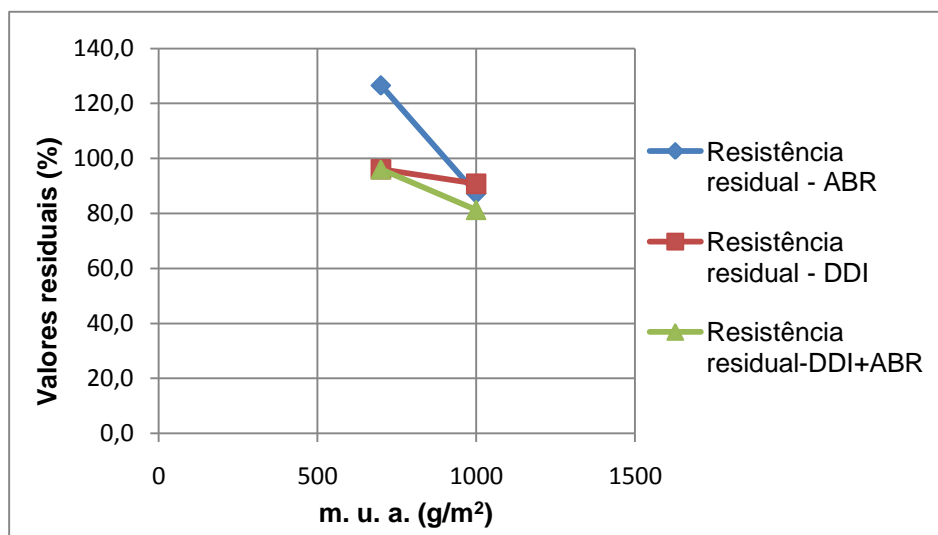


Figura 77. Variação da resistência à tracção em termos de valores residuais dos geotêxteis ensaiados por Pinto (2005), GTX1 e no âmbito do presente trabalho, GTX-N.

Relativamente à conjugação da DDI com a abrasão verifica-se que, no caso do GTX-N é a abrasão a responsável pela redução de resistência à tracção manifestada.

Na Figura 78 são apresentados os coeficientes de redução obtidos por Pinto (2005) em função da m.u.a. dos geotêxteis GTX1 e GTX2, o coeficiente de redução obtido no geotêxtil utilizado nos ensaios do presente trabalho, GTX-N, o coeficiente de redução obtido por Rosete (2010) com *corundum*, GTX3, e o coeficiente de redução correspondente à DDI com balastro para o GTX utilizado por Rosete (2010), determinado pela interpolação linear dos resultados obtidos para o GTX com 700g/m² e 1000g/m².

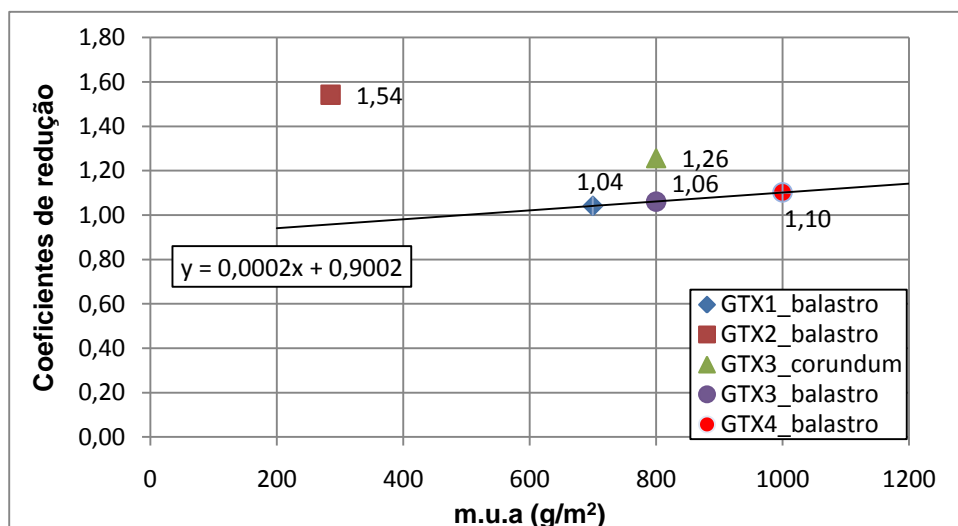


Figura 78. Coeficientes de redução obtidos para os geotêxteis ensaiados por Pinto (2005), Rosete (2010) e no âmbito do presente trabalho.

Da Figura 78 verifica-se que os efeitos da DDI, com balastro, são mais gravosos para o geotêxtil com menor m.u.a. (GTX2), já que o seu coeficiente de redução é mais elevado (1,54) do que o obtido para o GTX1 (1,04). Porém, a partir de determinada m.u.a. verifica-se uma tendência do aumento do coeficiente de redução, como é o caso do GTX-N que apresenta um coeficiente de 1,10. Note-se que esta conclusão pode não ser muito realista, face às diferenças das condições de ensaio descritas anteriormente. Para o GTX3, cujo ensaio de DDI foi efectuado com o *corundum*, efectuou-se uma interpolação linear dos resultados obtidos para os geotêxteis de m.u.a. de 700g/m² e de 1000g/m², apenas se utilizaram estes dois valores pelo facto de o GTX3 apresentar uma m.u.a. que se enquadra nos valores mencionados anteriormente. Deste modo, o coeficiente de redução estimado para o GTX3 após DDI com balastro é de 1,06 e que é inferior ao coeficiente obtido após DDI com *corundum* (1,26). A comparação destes valores indica que o agregado sintético poderá ser mais agressivo do que o balastro, no entanto, esta constatação deve ser comprovada por intermédio da realização de ensaios de DDI com balastro do GTX3. Após DDI combinada com abrasão, a redução da resistência à tracção segue a tendência descrita para a DDI, porém as reduções dos valores dos coeficientes de redução acentuam-se ligeiramente, com excepção do geotêxtil GTX1 cuja resistência se mantém igual à apresentada pela amostra submetida apenas à DDI.

4.1.2. Geocompósito de reforço (GCR)

4.1.2.1. Ensaio laboratoriais

Na Figura 79 são apresentadas as curvas força-extensão médias determinadas para as amostras de geocompósito intactas e danificadas em laboratório. Na Figura 80 estão as curvas força-extensão

dos provetes do GCR mais próximos da curva média para o material intacto, após abrasão, após DDI de referência; após DDI, e após DDI seguida de abrasão.

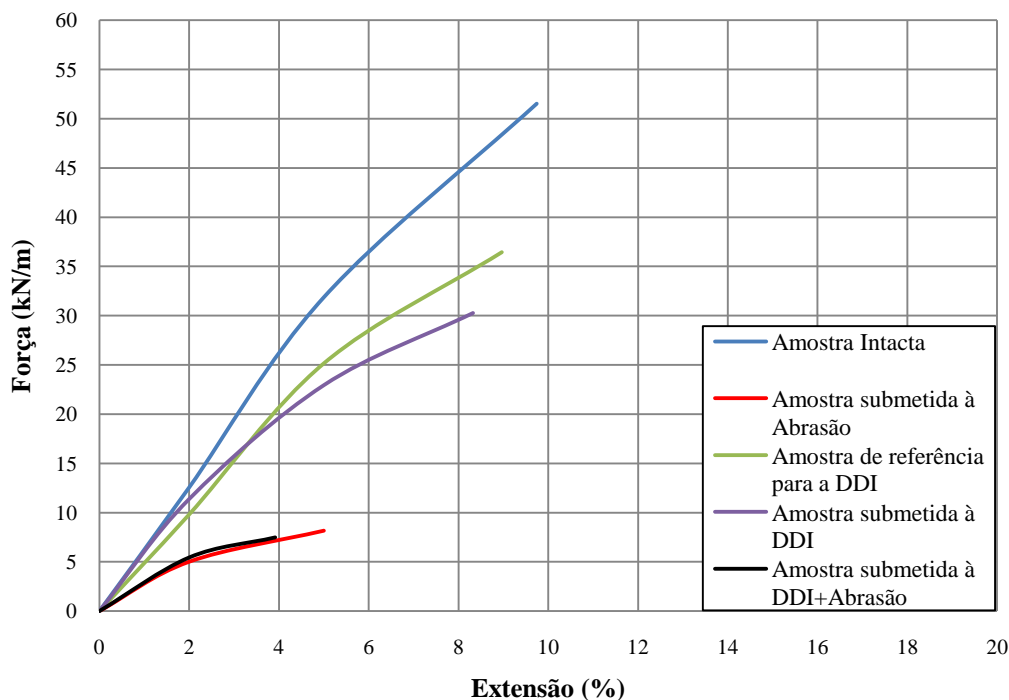


Figura 79. Representação das curvas médias força-extensão do geocompósito: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

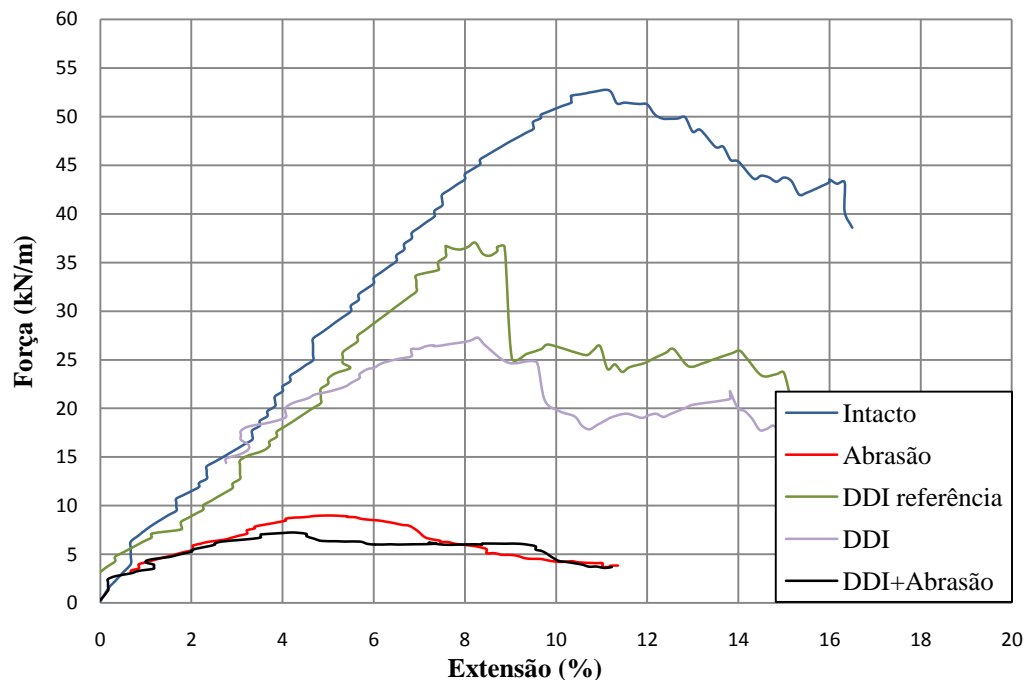
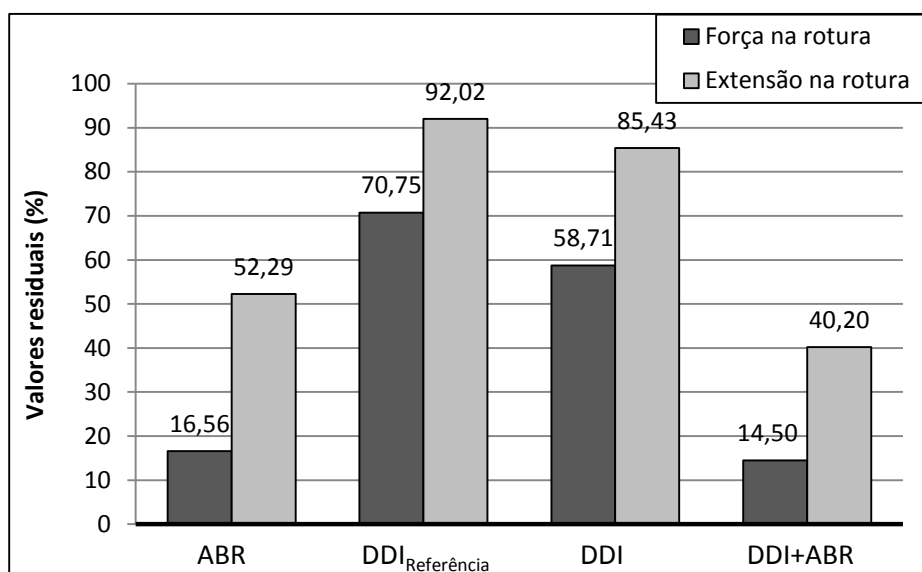


Figura 80. Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média do geocompósito nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

Após os diferentes danos induzidos, as curvas médias força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante embora apresentem diferenças significativas no que concerne aos valores de pico atingidos.

As curvas referentes às amostras após abrasão, e após DDI e abrasão (Figura 45 e Figura 54) evidenciam um comportamento diferente em relação às amostras intactas. Nas amostras intactas a rotura é brusca, enquanto para os referidos ensaios, a rotura é dúctil, ou seja, após o primeiro pico é progressivamente mobilizada a resistência do geotêxtil e dos cordões que até então ainda não romperam. Nas amostras intactas, após DDI de referência e após DDI, após ser atingida a força máxima o ensaio termina.

Na Figura 81a apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão, do geocompósito utilizado no presente estudo, para as condições após abrasão, após a submissão aos ensaios de referência para a DDI, após DDI e após DDI acrescida de abrasão. Estes valores foram determinados tendo em conta os valores obtidos para as amostras intactas. A mesma figura contém ainda os coeficientes de variação afectos a estas duas grandezas para cada situação de ensaio (Figura 81b).



a)

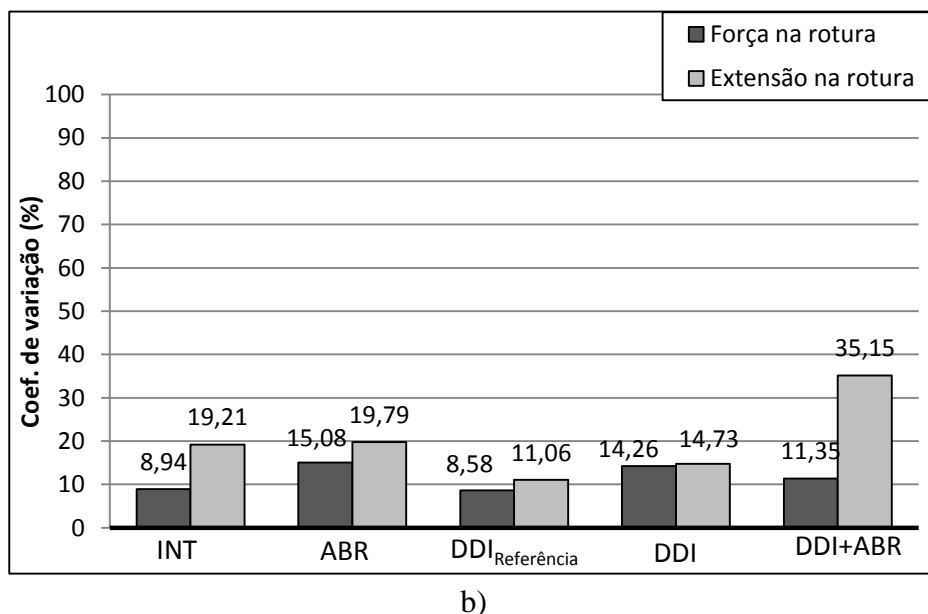


Figura 81. Geocompósito: a) valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação correspondentes (em %).

Da Figura 81a pode-se verificar que, após os danos induzidos (Abrasão, DDI_{Referência}, DDI e combinação DDI+Abrasão), ocorreu uma perda de resistência à tracção muito significativa, traduzindo-se em resistências residuais que oscilam entre os 14,50% e 70,75%, valores que reflectem a elevada gravosidade dos danos induzidos. As perdas mais significativas ocorreram nas amostras que foram submetidas à abrasão e à combinação da DDI com a abrasão (situações onde visivelmente os danos dos cordões de PET eram mais agressivos) apresentando, respectivamente, resistências residuais de 14,50% e 16,56%. Depois seguem-se as amostras submetidas apenas à DDI que apresentam uma perda de resistência de 41,29% e finalmente tem-se as amostras submetidas ao ensaio de referência para a DDI que manifestam perdas relativamente mais baixas, embora a redução seja considerável (29,25%).

A diferença dos valores das resistências residuais das amostras submetidas à abrasão e à combinação desta com a DDI é pouco significativa. Este facto parece indicar que, para o GCR e para as condições utilizadas neste trabalho, a abrasão é o mecanismo de degradação mais relevante.

Neste tipo de material (GCR), as perdas de resistência à tracção são mais acentuadas do que as do geotêxtil (GTX-N), apresentadas na secção 4.1.1.1. Este fenómeno está relacionado com o facto de os cordões de PET (que reforçam o geotêxtil de base e são muito responsáveis pela elevada resistência apresentada por este material) sofrerem danos significativos após os ensaios de danificação a que os provetes foram submetidos.

Relativamente às extensões residuais, estas apresentam valores variáveis que se enquadram entre 40,20% e 92,02%. A abrasão e a sua combinação com a DDI induzem danos estruturais

significativos, nomeadamente o aumento da extensibilidade dos cordões de PET, tal como se pode verificar na Figura 45 e na Figura 54, embora a Figura 81a indique o contrário, pois esta figura apenas traduz o comportamento inicial dos provetes até ao momento em que os cordões extremos se destacam do material geotêxtil que lhe serve de base

Os coeficientes de variação para a resistência à tracção apresentam alguma expressividade sendo que: o coeficiente mais elevado foi obtido para as amostras submetidas ao ensaio de abrasão (15,08%). No caso dos coeficientes de variação referentes à extensão na rotura, a dispersão dos resultados das amostras após os danos simulados é elevada e, portanto, os coeficientes obtidos são igualmente elevados sendo o valor mais elevado de 35,15% que se manifesta nas amostras submetida à DDI acrescida de abrasão.

Pelas mesmas razões especificadas na secção 4.1.1.1, na Figura 82, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão na rotura relativamente às amostras intactas e às amostras de referência.

Dessa figura pode-se verificar que os valores residuais, quer da resistência à tracção quer da extensão, relativos às amostras após DDI de referência, evidenciam uma redução de menor amplitude. Por exemplo, para a resistência à tracção das amostras submetidas à DDI passa-se de um valor residual de 58,71%, quando comparado com as amostras intactas para um valor residual de 82,99% quando comparado com as amostras de referência para a DDI.

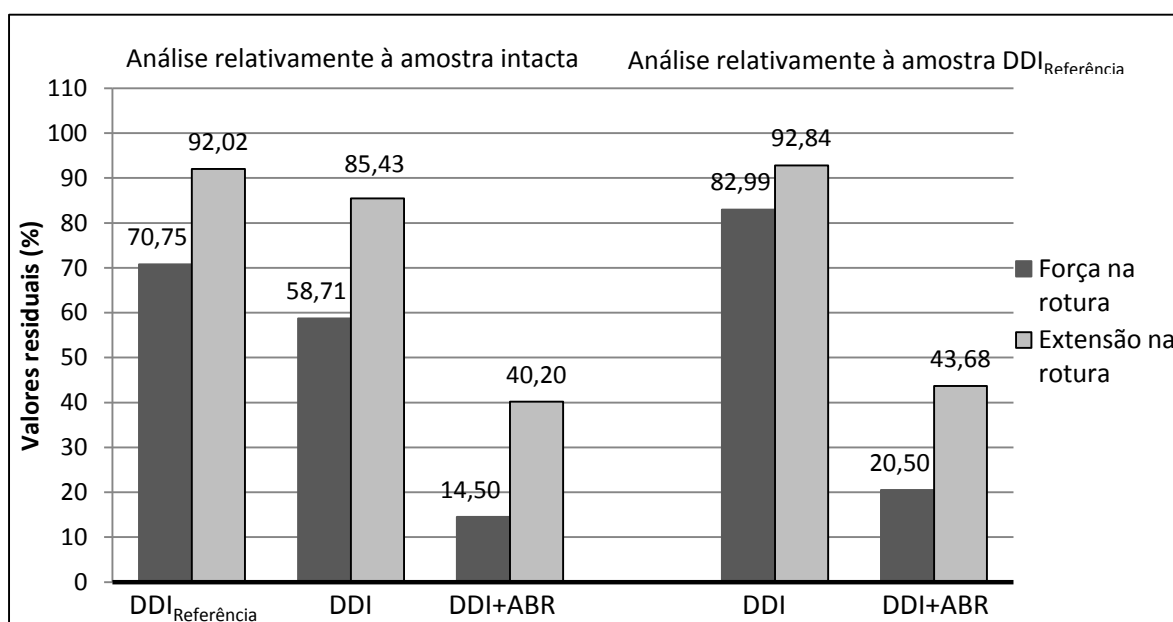


Figura 82. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão do GCR.

Na Figura 83 são apresentados os valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geocompósito intacto.

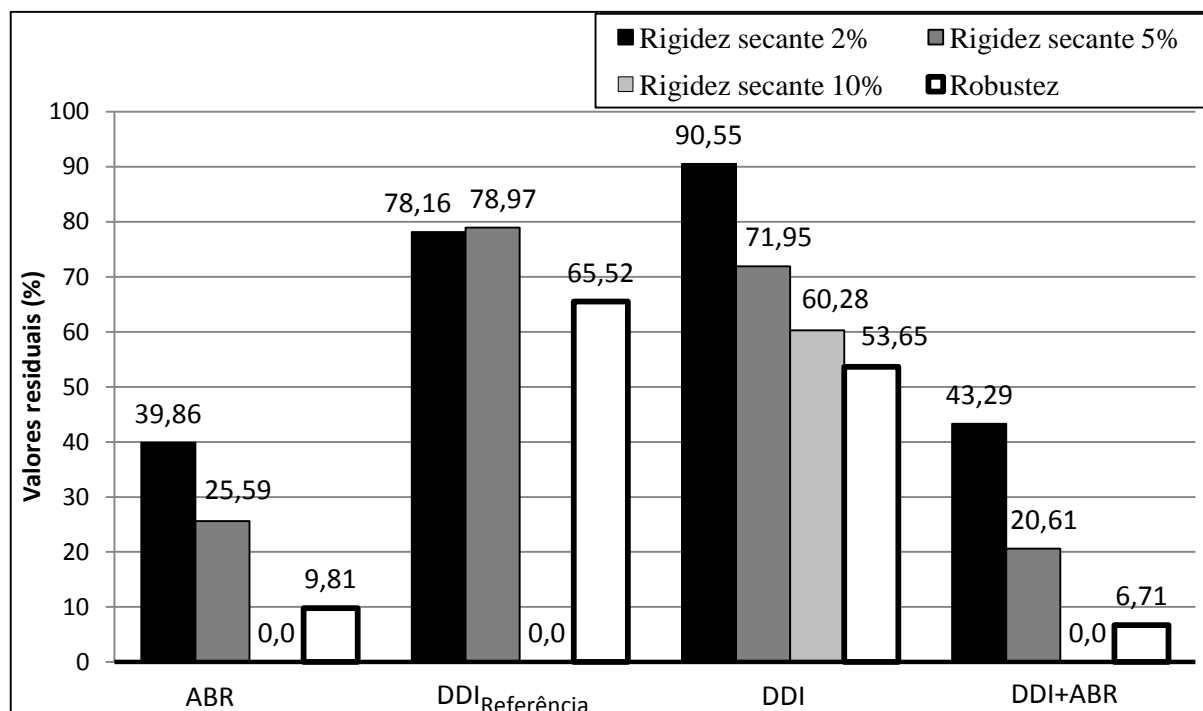


Figura 83. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao geocompósito intacto.

A rigidez secante residual para a extensão de 2% manifesta variações entre os 39,86% e 90,55% onde as maiores reduções surgiram nas amostras após abrasão (60,14%); após DDI_{Referência} a redução foi de 21,84%; após DDI a redução foi de 9,45% e após DDI e abrasão a redução foi de 56,71%.

A rigidez secante residual para a extensão de 5% manifesta variações entre os 20,61% e 78,97% onde as maiores reduções surgiram nas amostras após DDI e abrasão (79,39%); após abrasão a redução foi de 74,41%; após DDI_{Referência} a redução foi de 21,03% e após DDI a redução foi de 28,05%. Para a extensão de 10%, as reduções são de 39,72 % para as amostras após DDI.

Uma vez que houve uma grande redução dos valores de pico e do declive das curvas força-extensão médias é natural que as reduções verificadas na robustez sejam, também, bastante elevadas. Deste modo, da Figura 83 é possível verificar a discrepância de valores da robustez cujo valor residual mais elevado pertence à amostra submetida à DDI_{Referência} (65,52%) e o mais baixo ocorre nas amostras submetidas à DDI e abrasão (6,71%).

Na Tabela 30 encontram-se os coeficientes de redução determinados para o geocompósito, após os diferentes tipos de danos simulados.

Tabela 30. Coeficientes de redução do geocompósito.

CR _{ABR}	CR _{DDI}		CR _{DDI+ABR}	CR _{DDI} x CR _{ABR}	
6,04	1,70 (*)	1,20 (**)	6,89	10,29 (*)	7,28 (**)

(*) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes intactos

(**) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes de referência da DDI

Sempre que a abrasão é induzida, os coeficientes de redução obtidos são muito elevados pelo que se pode concluir que estes danos são preponderantes na determinação da resistência à tracção.

Desta tabela verifica-se que a acção combinada, no mesmo material, da DDI e abrasão conduz a um coeficiente de redução (6,89), inferior ao coeficiente obtido considerando a sobreposição dos fenómenos isoladamente ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) (10,29), de onde se pode concluir que a consideração do efeito conjunto destes dois fenómenos da forma tradicional (através da multiplicação dos coeficientes de segurança respectivos) conduz a um valor bastante mais conservativo. Esta tendência parece indicar que para o GCR há sinergia positiva entre a abrasão e a DDI.

4.1.2.2. Comparação com materiais utilizados noutros estudos

Na presente secção é efectuada uma comparação entre os resultados obtidos para o geocompósito utilizado no presente estudo laboratorial (GCR) e o geocompósito utilizado no trabalho desenvolvido por Rosete (2010), aqui designado por GCR1. A referida autora utilizou um geocompósito da mesma linha de produto do GCR. Isto é, os dois materiais têm origem no mesmo produtor e cujas características principais são idênticas (nomeadamente o geotêxtil de base). As diferenças resultam dos cordões que os constituem. Deste modo, Rosete (2010) utilizou um geocompósito (GCR1) cujos cordões de PET apresentam um diâmetro superior relativamente ao do GCR utilizado neste estudo o que, consequentemente, culmina num geocompósito mais resistente ($T_{Nom} = 75\text{kN/m}$) quando comparada com a do GCR ($T_{Nom} = 55\text{kN/m}$).

Na Tabela 31, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção para o geocompósito GCR1 ensaiado por Rosete (2010) e para o GCR ensaiado no âmbito do presente trabalho. Nesta tabela também se apresenta a transformação dos resultados obtidos por Rosete (2010) ($GCR1^{(**)}$). Esta transformação de resultados visa a conversão de uma análise, em que o GCR1 foi considerado como material contínuo, numa análise em que este material é encarado como se fosse uma grelha, considerando-se, deste modo, o número de cordões existente nos provetes ensaiados por Rosete (2010).

Deste modo, multiplicou-se os valores obtidos por Rosete (2010) pelo coeficiente que se encontra na equação 2.

$$\text{Coef} = \frac{B \times N_m}{N_s} \quad (2)$$

em que:

B – largura nominal do provete (m);

N_m – número mínimo de elementos a traccionar num metro de largura do produto a ensaiar;

N_s – número de elementos a traccionar existentes no provete.

Tabela 31. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção do GCR e GCR1.

Tipo de amostra	Valor médio da força na rotura (kN/m)			Coef. Variação (%)	
	GCR1 ^(*)	GCR1 ^(**)	GCR	GCR1	GCR
Intacta	83,46	85,64	51,54	5,15	8,94
Após abrasão	17,86	18,33	8,53	10,44	15,08
Após DDI	41,82	42,91	30,26	4,00	14,26
Após DDI+abrasão	15,37	15,77	7,48	2,70	11,35

(*) Valores determinados considerando o material como sendo do tipo contínuo

(**) Valores determinados considerando o material como grelha

Nota: A simulação da DDI do geocompósito GCR1 processou-se nas condições da norma EN ISO 10722:2007, ou seja, com recurso a um agregado sintético, o *corundum*, e à aplicação de uma tensão máxima de 500kPa.

Na Figura 84, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção para as amostras após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão, dos geocompósitos alvo de comparação.

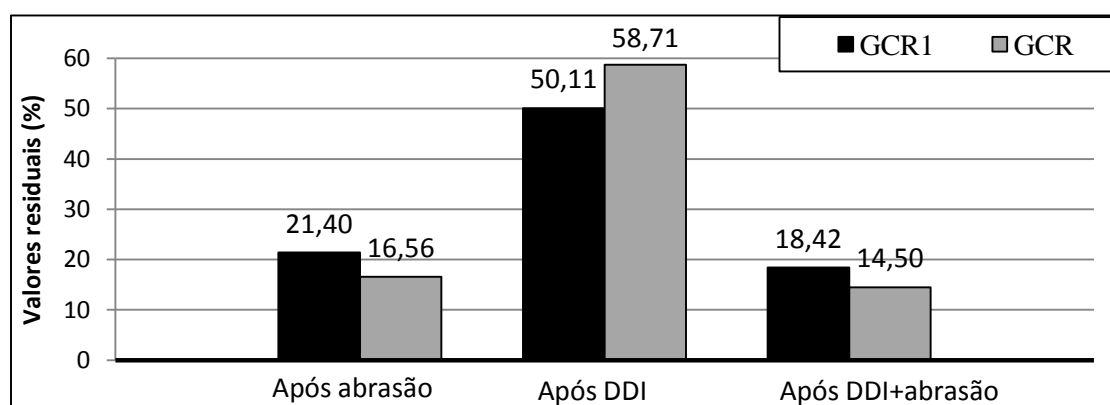


Figura 84. Valores residuais (em %) da resistência à tracção do GCR e do GCR1 para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.

Da Tabela 31 podemos constatar que, para as amostras intactas, o GCR1 (geocompósito ensaiado por Rosete (2010)) é o material que apresenta uma maior resistência, apesar de terem sido utilizados provetes com menor número de cordões (23 cordões) do que os utilizados neste trabalho (24 cordões). Deste modo, pode-se concluir que os cordões do GCR1 são mais resistentes e mais espaçados do que os do GCR.

De um modo geral, da Figura 84, pode-se verificar que as perdas de resistência são mais acentuadas no caso do GCR com excepção das amostras submetidas apenas à DDI.

Para as amostras submetidas à DDI não é possível efectuar uma comparação directa dos resultados obtidos, para os dois geocompósitos em análise, devido à diferença de material granular utilizado no ensaio de DDI assim como a carga aplicada (500kPa).

Tal como se referiu para o GCR, em ambos os geocompósitos de reforço se nota que dos agentes que afectam a durabilidade dos geossintéticos considerados a abrasão é o mais condicionante. Note-se que o ensaio de abrasão foi realizado nas mesmas condições para o GCR1 e o GCR.

Quanto à actuação simultânea da DDI com a abrasão, a tendência é a mesma que se observa para os resultados referentes apenas à abrasão. Assim, espera-se que a tendência (perda de resistência à tracção mais acentuada no GCR do que no GCR1) se mantenha após a utilização do balastro para simular os fenómenos de DDI no GCR1. É possível que o diferencial dos valores residuais apresentados por ambos os geocompósitos seja mais evidente, ou seja, o GCR1 apresentará, porventura, um valor residual superior ao apresentado na Figura 84. Caso isto se verifique, será clara a diferença de agressividade manifestada pelo *corundum* e pelo balastro.

4.1.3. Geogrelha tecida (GGR-T)

4.1.3.1. Ensaio laboratoriais

Na Figura 85 são apresentadas as curvas força-extensão médias determinadas para as amostras da geogrelha intactas e danificadas em laboratório. Na Figura 86 estão as curvas força-extensão dos provetes da GGR-T mais próximos da curva média para o material intacto, após abrasão, após DDI de referência; após DDI, e após DDI seguida de abrasão.

Na Figura 86 pode-se verificar que a rotura das amostras intactas e das amostras de referência para a DDI ocorreu para extensões e forças muito próximas. Nas restantes amostras verifica-se que, à medida que o nível de danificação aumenta, estas rompem para forças de tracção sucessivamente mais baixas. As curvas referentes às amostras após abrasão, e após DDI e abrasão (Figura 86) evidenciam um comportamento diferente em relação às restantes amostras: nas restantes amostras a rotura é brusca, enquanto, para os referidos ensaios, a rotura é dúctil, ou seja, uma vez atingida a resistência de pico o provete sofre uma diminuição da capacidade resistente, no entanto essa diminuição é gradual.

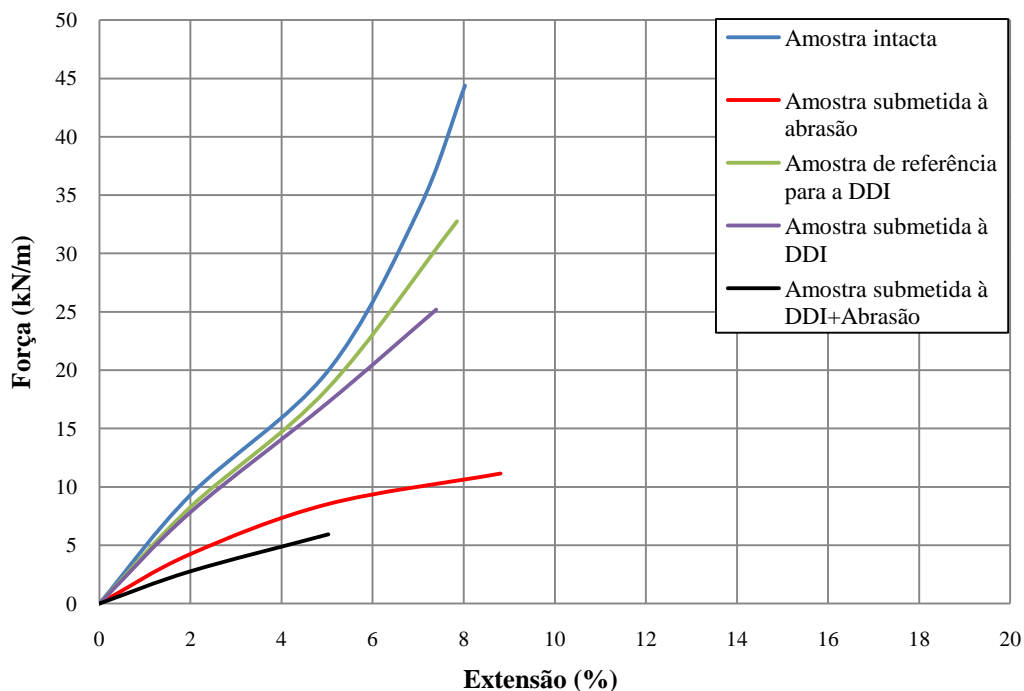


Figura 85. Representação das curvas médias força-extensão da geogrelha para as condições: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

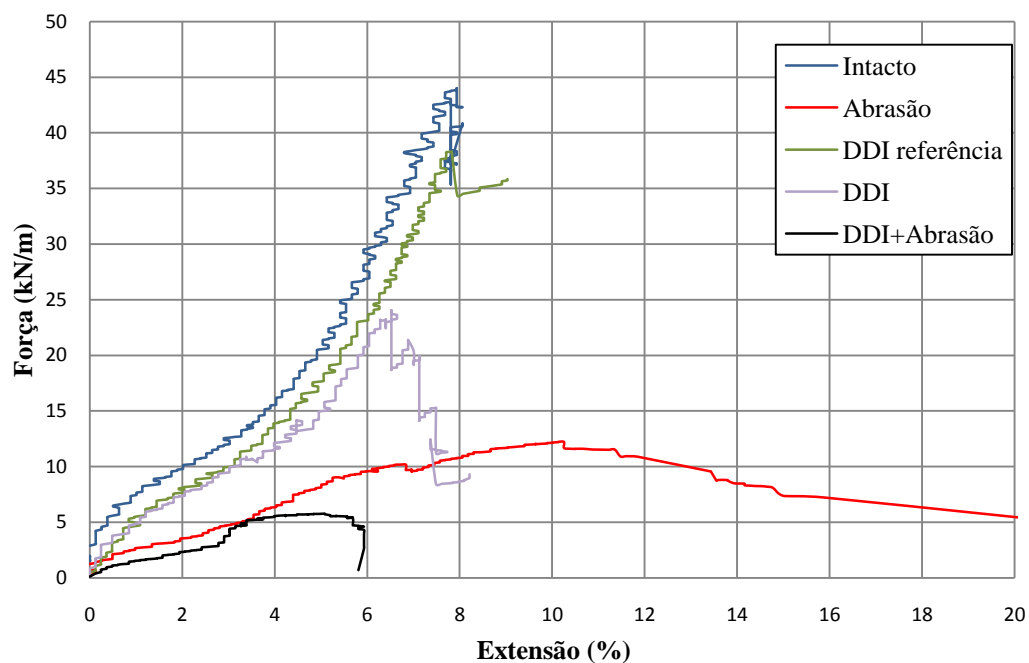
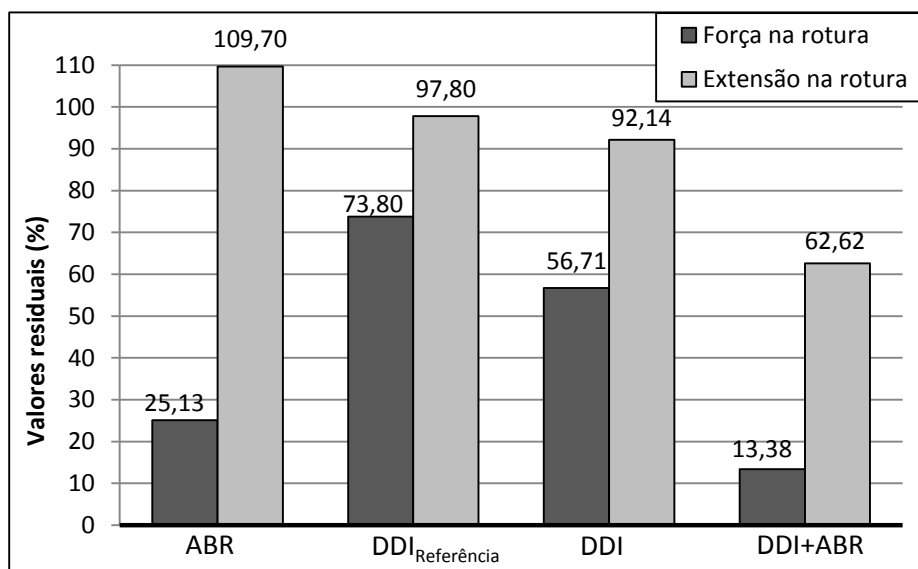


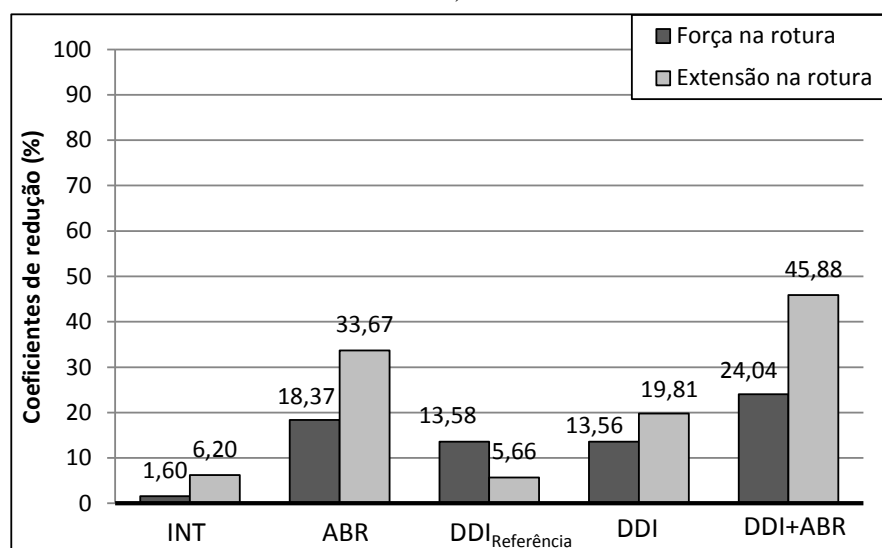
Figura 86. Representação da curva força-extensão do provete da GGR-T mais próximo da curva média para as situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

Na Figura 87a apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão, da geogrelha utilizada no presente estudo (GGR-T), para as condições após abrasão, após a submissão

aos ensaios de referência para a DDI, após DDI e após DDI acrescida de abrasão. Estes valores foram determinados tendo em conta os valores obtidos para as amostras intactas. A mesma figura contém ainda os coeficientes de variação afectos a estas duas grandezas para cada situação de ensaio (Figura 87b).



a)



b)

Figura 87. Geogrelha: a) valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão; b) coeficientes de variação (em %) correspondentes.

Da Figura 87a verifica-se que, após os danos induzidos ocorreu uma perda de resistência à tracção considerável, traduzindo-se em resistências residuais que oscilam entre os 13,38% e 73,80%, valores que reflectem o elevado índice de danificação induzida. As perdas mais significativas ocorreram nas amostras que foram submetidas à abrasão e à combinação da DDI com a abrasão apresentando, respectivamente, resistências residuais de 25,13% e 13,38%. Depois seguem-se as amostras submetidas apenas à DDI que apresentam uma perda de resistência de 43,29% e,

finalmente, tem-se as amostras submetidas ao ensaio de referência para a DDI, que manifestam perdas mais baixas, embora a redução seja considerável (26,20%). Relativamente às extensões residuais, estas apresentam valores variáveis que se enquadram entre 62,62% e 109,70%.

Os coeficientes de variação quer para a resistência à tracção quer para a extensão são expressivos. Tal expressividade reflecte a diferença de comportamento da geogrelha face aos danos que lhe foram induzidos, que apresentam um carácter aleatório, o que se repercute em coeficientes de variação elevados.

Pelas mesmas razões especificadas na secção 4.1.1.1, na Figura 88, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção e da extensão na rotura relativamente às amostras intactas e às amostras de referência para a DDI.

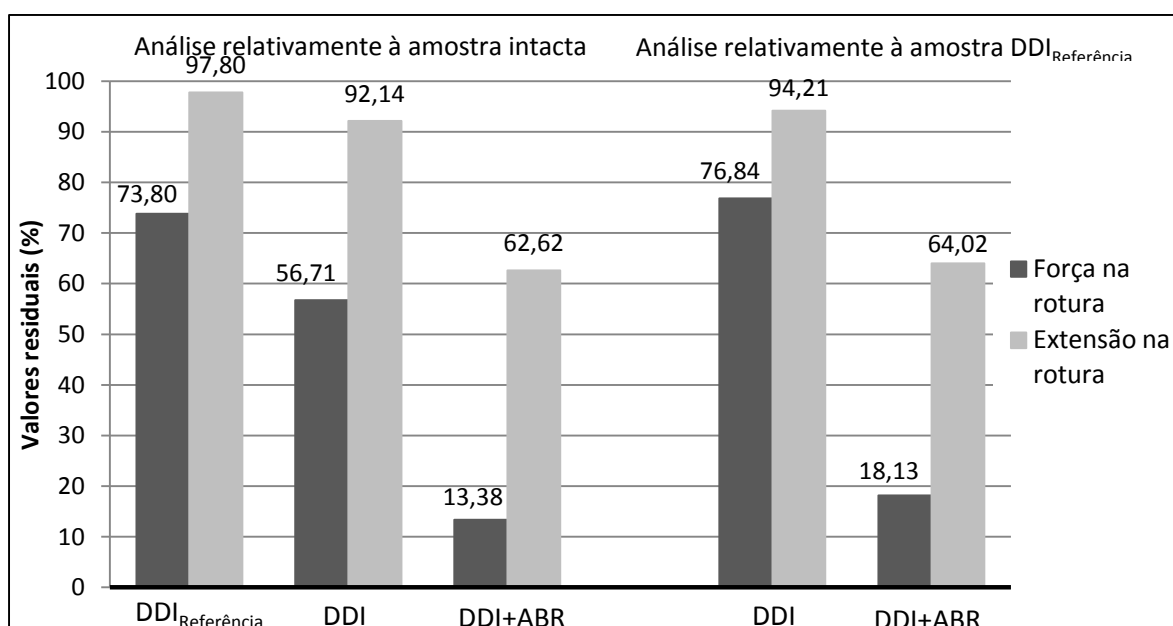


Figura 88. Valores residuais (em %) da resistência à tracção e da extensão para a GGR-T.

Na Figura 89 são apresentados os valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente à geogrelha intacta.

A rigidez secante residual para a extensão de 2% manifesta variações entre os 29,70% e 88,86% onde as maiores reduções surgiram nas amostras após DDI e abrasão (70,3%); após abrasão a redução foi de 54,38%; após DDI_{referência} a redução foi de 11,14% e após DDI a redução foi de 16,02%. Para a extensão de 5% verificam-se variações entre os 17,29% e 92,64% onde as maiores reduções surgiram nas amostras após DDI e abrasão (82,71%); após abrasão a redução foi de 57,07%; após DDI_{referência} a redução foi de 7,36% e após DDI a redução foi de 13,52%. Dado que houve algumas dificuldades na medição das extensões, estes valores têm que ser analisados com alguma cautela

A robustez das amostras submetidas à abrasão e à combinação desta com a DDI sofre reduções significativas (57,38% e 88,70% respectivamente) o que traduz uma redução dos valores de pico. Nas amostras submetidas à DDI verifica-se uma redução da robustez (34,26%) que corresponde, aproximadamente, ao dobro da redução sofrida pelas amostras de referência (16,56%).

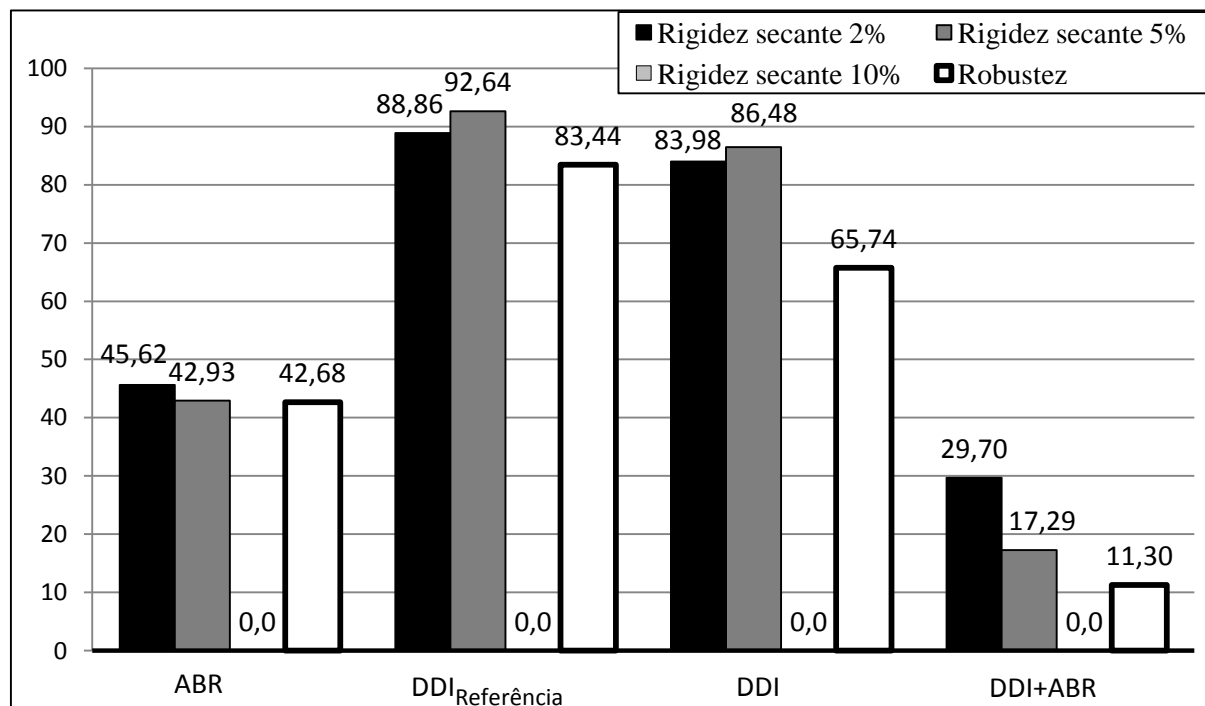


Figura 89. Valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente à geogrelha intacta.

Na Tabela 32 encontram-se os coeficientes de redução determinados para a geogrelha, após os diferentes tipos de danos simulados.

Tabela 32. Coeficientes de redução da geogrelha (GGR-T).

CR_{ABR}	CR_{DDI}		$CR_{DDI+ABR}$	$CR_{DDI} \times CR_{ABR}$	
3,98	1,76 (*)	1,30 (**)	7,47	7,02 (*)	5,18 (**)

(*) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes intactos

(**) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tracção dos provetes de referência da DDI

Mais uma vez, os coeficientes de redução são elevados, em particular quando a abrasão intervém, indiciando que os danos induzidos são preponderantes na caracterização do comportamento mecânico de curto prazo. Desta tabela verifica-se que a acção combinada da DDI e abrasão conduz a um coeficiente de redução (7,47) substancialmente superior ao coeficiente obtido considerando, da forma tradicional, a sobreposição dos fenómenos actuando isoladamente ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) (7,02). Assim, para as condições consideradas neste trabalho, parece que a metodologia tradicional de dimensionamento conduz a valores contra a segurança.

4.1.3.2. Comparação com materiais utilizados noutros estudos

Nesta secção é efectuada uma comparação entre a geogrelha tecida utilizado no presente estudo laboratorial (GGR-T) e a geogrelha extrudida biaxialmente (GGR-E) utilizada no trabalho desenvolvido por Rosete (2010) (Figura 90).

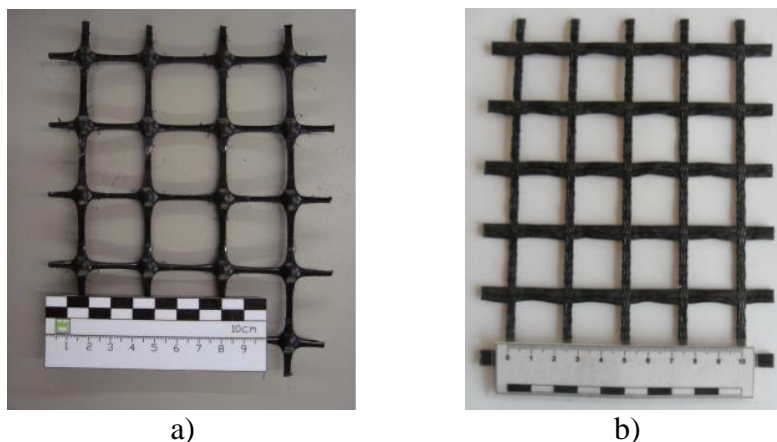


Figura 90. Geogrelhas: a) geogrelha extrudida biaxialmente (GGR-E) utilizada por Rosete (2010); b) geogrelha tecida (GGR-T).

Na Tabela 33, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção para a geogrelha GGR-E e para a GGR-T.

Na Figura 91, apresentam-se os valores residuais da resistência à tracção para as amostras após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão, das geogrelhas alvo de comparação.

Tabela 33. Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tracção das geogrelhas GGR-E e GGR-T.

Tipo de amostra	Valor médio da força na rotura (kN/m)		Coef. Variação (%)	
	GGR-E	GGR-T	GGR-E	GGR-T
Intacta	46,62	44,39	1,65	1,60
Após abrasão	43,93	11,15	3,43	18,37
Após DDI	47,08	25,17	0,43	13,56
Após DDI+abrasão	44,70	5,94	2,51	24,04

Nota: A simulação da DDI da geogrelha GGR-E processou-se nas condições da norma EN ISO 10722:2007, ou seja, com recurso a um agregado sintético, o *corundum*, e à aplicação de uma tensão máxima de 500kPa.

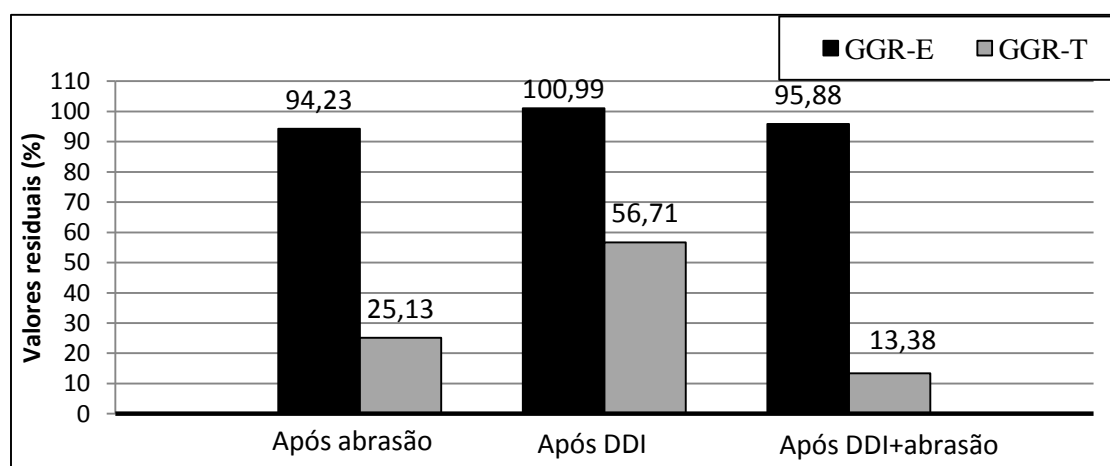


Figura 91. Valores residuais (em %) da resistência à tracção das geogrelhas para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.

Da Tabela 33 pode-se constatar que as amostras que são objecto de comparação da presente secção apresentam, para a situação intacta, resistência à tracção semelhantes, sendo porém ligeiramente superior a manifestada pela geogrelha GGR-E ($T_{Nom}=40\text{kN/m}$) quando comparada com a da GGR-T ($T_{Nom}=55\text{kN/m}$).

Da Figura 91, verifica-se uma maior perda de resistência à tracção para todos os tipos de danos induzidos da geogrelha GGR-T. Esta situação era, de certo modo, espectável pois a GGR-E apresenta uma maior rigidez, o que a torna menos vulnerável face às agressões simuladas laboratorialmente. Além disso, as juntas da GGR-E são integrais, já que este tipo de geogrelha é fabricado por perfuração, seguida de estiramento (neste caso, biaxial) de uma folha de polímero.

Por outro lado, é ainda de notar que os ensaios de DDI foram realizados em condições distintas. De facto, no que concerne à DDI e à combinação desta com a abrasão, a GGR-E foi solicitada pelo corundum e não o balastro e com uma tensão máxima aplicada menor (500kPa em vez de 900kPa). Estes agregados são bem distintos. De facto, o *corundum* tem partículas cujas dimensões variam entre 5 e 10mm, enquanto o balastro tem partículas com dimensões entre 16mm e 63mm. Assim, é natural que o balastro, quando instalado na caixa de DDI resulte num maior índice de vazios possibilitando a ocorrência da rotura das barras da geogrelha GGR-E quando submetida à DDI. Ou seja, se uma das barras da geogrelha se posicionar sobre um interstício e se por cima deste se encontrar uma partícula de balastro, ao efectuar o carregamento, essa partícula vai induzir uma deformação da geogrelha para a qual esta poderá não dispor de elasticidade suficiente para absorver essa deformação, acabando por romper (ver Figura 92). Porém, tal fenómeno necessita de ser comprovado por intermédio da realização de ensaios.

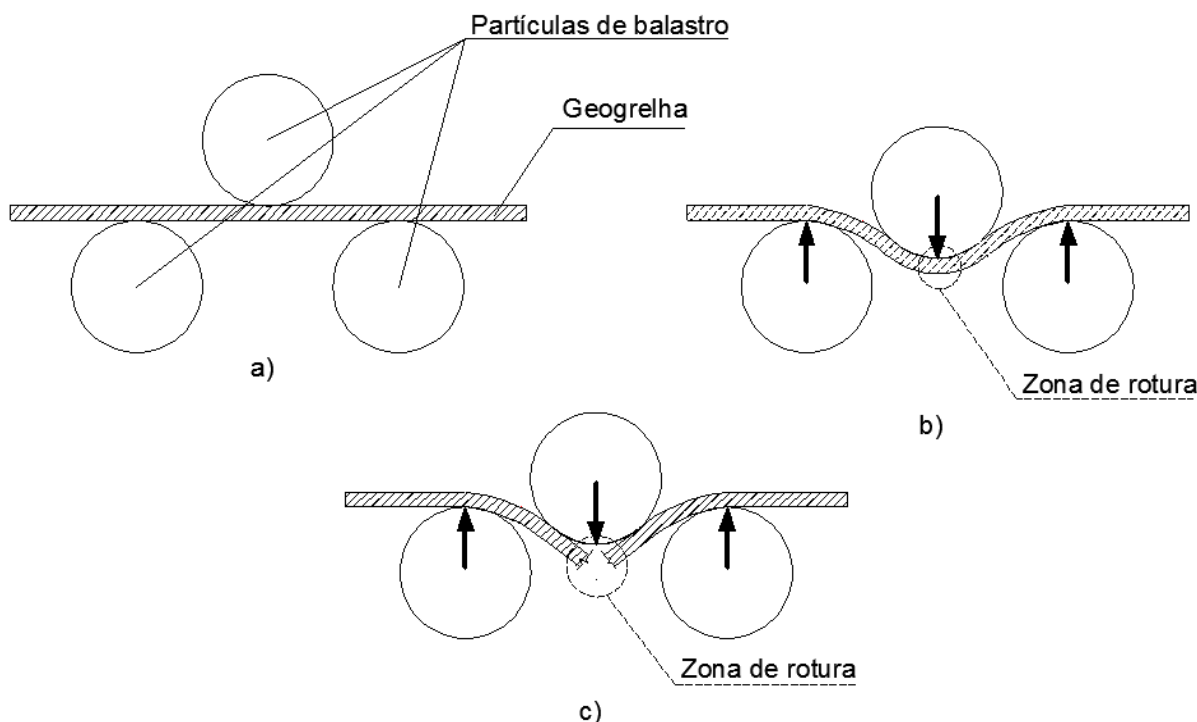


Figura 92. Processo de rotura de uma barra da geogrelha extrudada: a) exemplificação da barra da geogrelha antes do carregamento; b) comportamento durante o carregamento; c) eventual tipo de rotura.

Note-se que a GGR-T é uma geogrelha tecida e com um revestimento superficial. Por essa razão, ela é mais sensível à DDI do que uma geogrelha com a mesma resistência nominal mas extrudada (GGR-E), tal como observado por Pinho-Lopes (2006). Entre outros, esta autora realizou ensaios de DDI da GGR-E e de uma geogrelha muito semelhante à GGR-T com *corundum* e tensões máximas no ensaio de 900kPa que confirmam esta tendência. Assim, é de esperar que a realização de ensaios de DDI da GGR-E com balastro e uma tensão máxima de 900kPa conduza a reduções de resistência da GGR-E inferiores às observadas para a GGR-T.

4.2. Comparação dos resultados obtidos

Nesta secção efectua-se a comparação dos valores da resistência à tracção obtidos nos ensaios efectuados aos três geossintéticos em estudo, GTX-N, GCR e GGR-T, após a simulação laboratorial da DDI e abrasão, isoladamente, e após a sua combinação.

Na Figura 93 são apresentados os valores disponibilizados pelos fabricantes e os valores obtidos nos ensaios sobre amostras intactas, após simulação da abrasão, após a realização dos ensaios de referência para a DDI, após DDI e após a combinação da DDI com a abrasão.

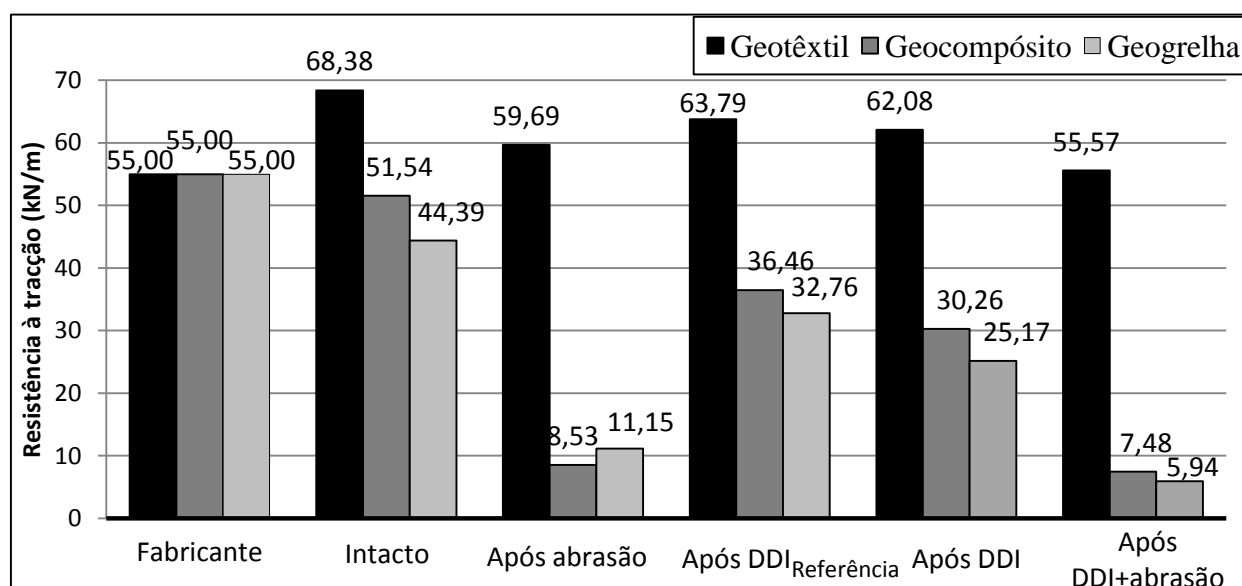


Figura 93. Comparação dos resultados, em termos de resistência à tracção (kN/m), para os geossintéticos estudados no âmbito do presente trabalho.

Pela análise global da Figura 93, pode-se constatar que os tipos de mecanismos de simulação de danos (DDI, abrasão e a sua combinação) manifestam efeitos distintos nos geossintéticos ensaiados, embora todos exibam reduções de resistência.

Para o geotêxtil (GTX-N), a abrasão induzida provoca reduções bastante inferiores às sofridas pelo geocompósito (GCR) e pela geogrelha (GGR-T), sendo a do geocompósito mais acentuada do que a da geogrelha. Tal acontece devido à agressividade dos danos induzidos nos cordões de PET do geocompósito. Para a geogrelha foram observados o destacamento da camada superficial que reveste as fibras de PET e a desconexão das fibras, que constituíam as barras, que se encontravam inicialmente justapostas. Estes resultados parecem indicar que materiais com estruturas do tipo do GCR e da GGR-T podem não ser os mais indicados para aplicações em que a abrasão é relevante, como é o caso do reforço de balastro em vias-férreas.

Relativamente aos provetes submetidos ao ensaio de referência para a DDI, verificam-se reduções significativas, principalmente no geocompósito (GCR) e na geogrelha (GGR), mas de menor amplitude, quando comparadas com as reduções exibidas pelas amostras submetidas à abrasão. O geotêxtil apenas sofreu alguma abrasão superficial e contusões, o que explica a sua reduzida perda de resistência à tracção, porém, o geocompósito e a geogrelha, após DDI de referência, manifestavam cortes parciais ou totais de alguns dos cordões e barras, respectivamente, o que originou a acentuada descida da resistência manifestada por estes materiais. Uma vez mais, estes resultados mostram a sensibilidade deste tipo de materiais ao contacto sob solicitações cíclicas com um agregado como o balastro.

Nas amostras submetidas, isoladamente, à DDI as reduções da resistência são muito semelhantes às manifestadas pelas amostras de referência sendo, porém, ligeiramente superiores. Pois, na presente situação, os danos manifestados são mais superficiais mas existem em maior porção e apresentam uma maior dispersão.

No que concerne às amostras submetidas à DDI combinada com a abrasão, pode-se verificar que, mais uma vez, as amostras manifestam resistências à tracção inferiores às amostras intactas, porém essas reduções são mais acentuadas no caso do geocompósito e da geogrelha, pelo facto da simulação da abrasão induzir danos extremamente nefastos nos cordões e nas barras dos referidos materiais. Tal como já foi referido anteriormente, para estes materiais, de entre os agentes considerados neste trabalho e que afectam a durabilidade dos geossintéticos, a abrasão parece ser o que mais condiciona o seu comportamento mecânico de curto prazo.

É de referir que, independentemente do tipo de dano induzido, todas as amostras do geotêxtil apresentam resistências superiores às especificadas pelo fabricante. Assim, parece que para o GTX-N a diferença entre o valor nominal dessa resistência e a real (medida para os provetes intactos) é suficiente para “absorver” os efeitos da DDI e da abrasão e da DDI + abrasão.

O aspecto exibido pelas amostras de geotêxtil (GTX-N) e pelo geocompósito (GCR), quer após a simulação da abrasão, quer após ensaios de DDI e abrasão, apresenta, dentro de cada um dos danos induzidos, padrões idênticos. Tanto o geotêxtil (GTX-N) como o geotêxtil de base do geocompósito (GCR) são constituídos por filamentos contínuos, pelo que os danos provocados pela abrasão e pela DDI e abrasão (combinadas) são semelhantes. Note-se que, apesar dos danos sofridos serem idênticos, as variações obtidas para as propriedades consideradas não são iguais, já que os geossintéticos não possuem as mesmas propriedades físicas (espessura e m.u.a.) e mecânicas (resistência à tracção) e, no caso do geocompósito, o grau de danificação dos cordões de PET é mais condicionante que a danificação do geotêxtil de base.

Os resultados obtidos, para cada uma das condições analisadas, indicam que a estrutura do material é preponderante na caracterização em termos de resistência à tracção.

Regra geral a avaliação do comportamento dos geossintéticos é efectuada tendo como base na sua resistência máxima à tracção e extensão correspondente. Contudo para estruturas cujo valor da deformação é reduzido, o que irá condicionar o comportamento desses materiais é a sua rigidez, nomeadamente o Jsec 2%, Jsec 5% ou o Jsec 10%, dependendo do valor das deformações máximas admitidas para a estrutura em que estes são inseridos.

Nos geossintéticos a redução dos seus parâmetros de pico (resistência à tracção e extensão na rotura) provoca a alteração do seu comportamento, que se manifesta, geralmente, pela diminuição

do declive da curva força-extensão do material. Como consequência dessa diminuição no declive, acontece que a deformação máxima é atingida para valores de força menores.

Deste modo, para o dimensionamento de geossintéticos, em que o seu comportamento mecânico seja relevante, é necessário contabilizar o efeito dos vários agentes e mecanismos que afectam a sua durabilidade em termos das variações dos parâmetros de pico e da rigidez, correspondente aos valores da extensão máxima admissível na obra em causa.

4.3. Conclusões

No presente trabalho efectuou-se uma avaliação dos efeitos resultantes da abrasão, dos efeitos da danificação durante a instalação (DDI) e dos efeitos da conjugação simultânea da abrasão com a DDI em três geossintéticos com características estruturais distintas. A caracterização dos danos evidenciados por estes materiais processou-se em termos da avaliação do comportamento mecânico de curto prazo (através de ensaios de tracção) dos referidos materiais, tendo como referência os resultados obtidos para o material intacto e os resultados dos materiais submetidos ao ensaio de referência para a DDI, tal como especifica a norma EN ISO 10722:2007. Com os resultados obtidos foi possível calcular os coeficientes de redução a utilizar no dimensionamento dos geossintéticos em estudo, que traduzem os mecanismos de danificação simulados no âmbito deste trabalho.

Os ensaios de simulação laboratorial da abrasão seguiram os procedimentos descritos na norma NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998). Este ensaio pretende simular a abrasão que os geossintéticos sofrem quando o balastro, com que contacta directamente, sofre deslocamentos provocados pela aplicação das cargas provenientes do tráfego ferroviário. O presente ensaio consiste na colocação de um provete numa plataforma fixa onde este é friccionado por um abrasivo com características de superfície P100 durante 750 ciclos.

Os ensaios de simulação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos seguiram, de uma forma geral, os pressupostos enunciados na norma EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007). Com este ensaio pretende-se avaliar a redução da resistência que os geossintéticos sofrem devido às operações de manuseamento, colocação e compactação do material de aterro junto dos mesmos. No referido ensaio optou-se por produzir uma pressão sinusoidal, na placa de carregamento, entre os 900 ± 10 kPa e $5 \pm 0,5$ kPa, a uma frequência de 1 Hz, obtendo-se deste modo resultados mais conservativos. Além

disso, para representar de forma mais realista o que ocorre em aplicações de geossintéticos em vias-férreas, o agregado utilizado no ensaio de DDI foi um balastro.

A conjugação destes dois ensaios (DDI+abrasão) surge com o intuito de averiguar se a acção combinada destes dois fenómenos produz os mesmos efeitos que a sobreposição dos mesmos, isto é, se existe algum efeito sinérgico entre estes mecanismos e os seus efeitos.

Para o geotêxtil foi efectuada uma comparação com os resultados apresentados por Pinto (2005) e por Rosete (2010), sendo que esta última autora utilizou o agregado sintético especificado pela norma EN ISO 10722:2007, para a simulação dos fenómenos da DDI e uma tensão máxima de 500kPa. Efectuou-se ainda uma comparação dos coeficientes de redução obtidos para o geotêxtil ensaiado por Rosete (2010) após a simulação da DDI com *corundum*, e o valor do coeficiente de redução obtido por interpolação linear dos coeficientes obtidos no presente trabalho e por Pinto (2005) para dois geotêxteis com diferentes massas por unidade de área. Para o geocompósito e para a geogrelha efectuaram-se comparações com os valores apresentados para materiais análogos por Rosete (2010), tendo-se em atenção o facto de esta autora ter usado materiais com características distintas e ter simulado a DDI com o *corundum* e com uma tensão máxima de 500kPa.

Atendendo aos resultados obtidos, podem-se inferir as seguintes conclusões:

- Nos ensaios de tracção efectuados sobre amostras intactas, verifica-se que no caso do geotêxtil (GTX-N), a resistência à tracção é superior, cerca de 24,36%, à especificada pelo fabricante, o que indicia alguma cautela, por parte do fabricante, aquando da divulgação das características do seu produto. Porém, no caso do geocompósito (GCR) e da geogrelha (GGR-T) os valores obtidos são inferiores aos do fabricante sendo essa diferença mais pronunciada no caso da geogrelha. Tais diferenças de valores poderão, porventura, estar relacionadas com as condições em que se processa o ensaio em causa, nomeadamente a utilização das garras cilíndricas para a GGR-T. Em relação à extensão para a força máxima, verifica-se a redução do seu valor para o geocompósito e a geogrelha à excepção do geotêxtil onde se verifica o aumento da extensão na rotura, face aos valores apresentados pelo fabricante;
- Os efeitos da abrasão verificados no geotêxtil e no geocompósito, através da inspecção visual dos provetes danificados, foram essencialmente a desagregação superficial, o destacamento e a reorientação dos filamentos numa direcção preferencial (do ensaio), e estão de acordo com os processos de abrasão descritos por Van Dine *et al.* (1982), apresentados na Tabela 5. Nos ensaios de abrasão do geocompósito foi ainda verificado o destacamento parcial dos filamentos de poliéster da estrutura do geotêxtil e a sua danificação, em que os filamentos, inicialmente entrelaçados, dividem-se em dois; também

- se verificou a contracção lateral das amostras devido à tensão induzida pelo esticador, utilizado para eliminar as folgas entre a amostra e a placa superior do equipamento;
- Após abrasão, verificam-se reduções da resistência à tracção que oscilam entre os 12% e 84%. Sendo a maior redução, 84%, evidenciada pelo geocompósito (GCR). Para o geotêxtil (GTX-N) e para a geogrelha (GGR-T) as reduções são, respectivamente, de 12% e 75%. Em relação à extensão para a força máxima, verifica-se a redução do seu valor para os três geossintéticos ensaiados. A grande diminuição do valor da resistência à tracção do geocompósito deve-se essencialmente à abrasão dos cordões (filamentos de PET), já que no geotêxtil de base do GCR apenas se verifica a desagregação superficial, sem a ocorrência visível do corte de filamentos da estrutura de geotêxtil;
 - Nos geossintéticos ensaiados verifica-se que o efeito do ensaio de referência para a DDI provoca alterações significativas no comportamento mecânico de curto prazo, nomeadamente nos valores de pico, do geocompósito e da geogrelha. No geotêxtil a danificação de referência induzida laboratorialmente com o balastro não provoca alterações significativas nos valores de pico, enquanto no geocompósito há uma redução da sua resistência em cerca de 33% e uma diminuição da sua deformabilidade (10%), em relação aos valores determinados para os materiais intactos. Relativamente aos valores limite obtidos para a geogrelha, as alterações mais importantes surgem no valor médio da resistência à tracção, onde se verifica uma redução de 26%. Quanto ao valor da extensão obtido para a GGR este apresenta uma redução insignificante, cerca de 1,25%, em relação aos valores determinados para os materiais intactos;
 - Nos geossintéticos estudados verifica-se que o efeito da DDI, no seu comportamento mecânico de curto prazo, provoca alterações bastante distintas nos parâmetros de pico (resistência à tracção e extensão correspondente), na rigidez secante e na robustez dos materiais. Estas alterações são mais pronunciadas no caso do geocompósito (GCR) e da geogrelha (GGR), pois os ensaios da DDI induzem danos, essencialmente, nos elementos que conferem a resistência à tracção dos materiais em causa (filamentos de PET, no caso do geocompósito, e barras de PET, no caso da geogrelha). No geotêxtil a danificação induzida laboratorialmente com o balastro não provoca alterações significativas nos valores de pico, enquanto no geocompósito há uma redução da sua resistência em cerca de 41% e de 17% quando comparado com as amostras intactas e com as amostras de referência para a DDI, respectivamente. Relativamente aos valores limite obtidos para a geogrelha, as alterações mais importantes surgem no valor médio da resistência à tracção, onde se verifica uma

redução de 77% e de 23% quando comparado com as amostras intactas e com as amostras de referência para a DDI, respectivamente;

- Atendendo aos valores obtidos para a resistência à tracção das amostras após DDI, pode concluir-se que os seus efeitos dependem bastante do tipo de geossintético considerado, nomeadamente da sua estrutura. De facto, para o geotêxtil verifica-se uma redução de 9% na sua resistência após DDI, enquanto no geocompósito e na geogrelha, a redução da resistência é de cerca de 41% e 77%, respectivamente, quando comparado com as amostras intactas;
- A conjugação dos fenómenos de DDI e abrasão teve consequências gravosas principalmente para o geocompósito e para a geogrelha. Para estes dois materiais, verifica-se uma diminuição significativa da sua resistência à tracção e da extensão de pico, que no caso do geocompósito são de 85% e 60%, respectivamente e no caso da geogrelha são de 87% e de 38%, respectivamente, em comparação com a amostra intacta. Para o geotêxtil a redução da resistência é menor (cerca de 19%), mas mais significativa do que as reduções verificadas considerando os fenómenos isoladamente;
- Após ensaios de DDI e abrasão, o aspecto do geotêxtil (GTX-N) e do geocompósito (GCR) era bastante semelhante. Apesar de os danos serem visualmente idênticos, as variações obtidas não são iguais, já que os geossintéticos (GTX-N e geotêxtil da base do GCR) não possuem a mesma espessura e m.u.a. e têm estruturas diferentes. No caso do geocompósito (GCR), o grau de danificação dos cordões de PET é mais condicionante do que a danificação do geotêxtil de base;
- Nas amostras de geotêxtil (GTX-N) e geocompósito (GCR), submetidas apenas a abrasão, não ocorreu o corte de filamentos durante esse ensaio, e portanto os seus efeitos manifestaram-se essencialmente pela desagregação superficial. No caso dos ensaios de abrasão em amostras previamente sujeitas a DDI, a danificação induzida pode ter provocado o corte dos filamentos superficiais do geotêxtil (GTX-N) e do geotêxtil de base do geocompósito (GCR), permitindo que durante o ensaio de abrasão os filamentos fossem facilmente desagregados, destacados e reorientados segundo uma orientação preferencial (a direcção do ensaio);
- Atendendo à norma EN ISO 10722:2007, em que esta especifica que os valores obtidos para as amostras submetida à DDI não devem ser comparados com os valores referentes à amostra intacta mas sim com uma amostra, que no presente documento se designou por amostra de referência para a DDI, a qual se obtém pela indução de um pequeno grau de

danificação nas amostras intactas, verifica-se que ao comparar os resultados obtidos nas amostras após DDI com os das amostras de referência, a perda de resistência é inferior à manifestada quando tal comparação é efectuada relativamente às amostras intactas, ou seja, a versão mais recente, da presente norma, é menos conservativa do que as versões mais antigas;

- Os coeficientes de redução para a resistência à tracção obtidos evidenciam as variações nas propriedades mecânicas a curto prazo dos geossintéticos considerados neste estudo. Os valores obtidos para o geotêxtil (GTX-N) são próximos da unidade, o que evidencia a elevada sobrevivência deste material em relação aos agentes considerados. Este facto resulta do valor elevado da m.u.a. do GTX-N. Para o mesmo material verifica-se que a consideração da sobreposição tradicional dos efeitos da DDI com a abrasão ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) gera um coeficiente de redução semelhante ao da conjugação dos efeitos da DDI com a abrasão ($CR_{DDI+ABR}$). Quanto aos restantes materiais (geocompósito e geogrelha) tais coeficientes apresentam valores bastante elevados, indicando que os tipos de danos induzidos (DDI, abrasão e a sua combinação) são bastante determinantes na sua resistência à tracção a curto prazo. Os elevados coeficientes de variação obtidos para as diversas grandezas, associados às amostras após ensaios de DDI e abrasão (isolados e combinados), evidenciam a heterogeneidade na resposta dos geossintéticos após os diferentes danos induzidos. Para estes dois materiais (GCR e GGR-T) verifica-se que a consideração tradicional da sobreposição dos efeitos da DDI com a abrasão ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) gera um coeficiente de redução que é superior, no caso do geocompósito, e inferior (contra a segurança), no caso da geogrelha, ao da conjugação dos efeitos da DDI com a abrasão ($CR_{DDI+ABR}$);
- Quanto à rigidez verifica-se que, no caso do geotêxtil (GTX-N) a rigidez das amostras após os fenómenos de DDI e abrasão (isolados e combinados) aumenta, devido ao aumento do declive das curvas força-extensão pois os danos induzidos provocaram uma redução quer da extensão quer da resistência de pico, porém a extensão diminui mais do que a resistência de pico traduzindo-se em declives mais acentuados. No caso do geocompósito (GCR) e da geogrelha (GGR-T), esses mesmos danos, reduziram a rigidez das amostras pois nestes materiais, as reduções da resistência à tracção eram mais acentuadas do que as reduções da extensão o que, efectivamente, provocou uma diminuição do declive das curvas força-extensão;
- A robustez dos geossintéticos apresenta valores muito distintos, reflectindo as variações obtidas em termos de resistência à tracção e respectiva extensão, para os diferentes tipos de

danos induzidos. De um modo geral, as maiores reduções do valor da robustez surgiram nas amostras submetidas ao efeito combinado da danificação durante a instalação e abrasão.

5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da influência dos efeitos da DDI, com balastro, e da abrasão na durabilidade dos geossintéticos em aplicações ferroviárias, nomeadamente no que diz respeito ao seu comportamento mecânico de curto prazo.

Do presente estudo constatou-se que a aplicação directa dos geossintéticos na camada de balastro é extremamente exigente, principalmente devido à amplitude e à agressividade dos danos induzidos por este material. Deste modo, a avaliação dos fenómenos de abrasão e de danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos, revela-se uma temática de extrema importância, de modo a garantir, em dimensionamento, o correcto funcionamento destes materiais geossintéticos face às funções que lhes são exigidas na aplicação em causa.

Perante os resultados obtidos, torna-se necessário aprofundar e realizar mais estudos sobre os factores que influenciam o efeito da danificação durante a instalação de geossintéticos, tais como o tipo de geossintético, o tipo de material de confinamento e a metodologia de instalação dos geossintético.

Por outro lado, tendo em conta as solicitações a que os geossintéticos ficam sujeitos, durante todo o período de vida útil, quando aplicados em obras ferroviárias, nomeadamente a abrasão, e que os seus efeitos podem pôr em causa o seu funcionamento, torna-se evidente a necessidade da realização de mais ensaios laboratoriais de abrasão, em vários tipos de geossintético.

De forma a desenvolver o trabalho efectuado, como prosseguimento dos estudos seria necessário:

- A realização de ensaios de DDI com o agregado sintético especificado na norma EN ISO 10722:2007 de modo a averiguar a influência do material de confinamento nas propriedades mecânicas de curto prazo;
- A realização de ensaios de referência para a DDI, em que, no caso do geocompósito (GCR), a face sem cordões era colocada em contacto directo com o balastro a fim de se averiguar a influência do posicionamento do geossintético face ao agregado considerado;
- A realização de ensaios de DDI com uma caixa de maior dimensão em altura de modo a que o material de confinamento seja colocado o mais naturalmente possível, de forma a eliminar eventuais efeitos de escala nos ensaios realizados neste trabalho;

- Atendendo aos elevados coeficientes de redução associados à abrasão (CR_{ABR}) e à combinação desta com a DDI ($CR_{DDI+ABR}$) das amostras de geocompósito e da geogrelha, torna-se necessário efectuar ensaios de modo a averiguar se o nível de dano induzido laboratorialmente corresponde ao nível de dano que, efectivamente, ocorre no fim do período de vida útil estipulado para a construção férrea;
- O desenvolvimento de ensaios laboratoriais que reproduzam, realisticamente, as condições verificadas “*in situ*” (carregamento e espessura das camadas de confinamento), para geossintéticos aplicados em vias-férreas;
- O estudo do comportamento dos geossintéticos tendo em vista a sua incorporação em obras de reabilitação e de reforço de vias-férreas, ou seja, a elaboração de ensaios de DDI com balastro reutilizado, cuja agressividade será, porventura, mais elevada do que a do balastro novo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brown, R. P. e Greenwood, J. H. (2002). "Practical guide to the assessment of the useful life of plastics". Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, U.K., SY4 4NR, 180p.
- Brown, S. F., Kwan, J. e Thom, N. H. (2007). "Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, nº 6, pp.326-335.
- Carneiro, J. R. C. (2009). "Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental : a importância da incorporação de aditivos químicos". Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Universidade do Porto, FEUP, Porto, 534p.
- Christopher, B. R. e Elias, V. (1998). "Evaluation of installation damage in geosynthetics: a US perspective". Seminar volume on Installation Damage in Geosynthetics, November 1998, ERA Technology, Leatherhead, U.K., pp. 1.2.1-1.2.12.
- Elias, V. (2000). "Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes". National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, D.C.,USA, report FHWA-NHI-00-044, 94p.
- Faure, Y. H. e Imbert, B. (1996). "Use of geotextiles to prevent fine material from polluting railway subgrades". *Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, pp.479-486. Balkema, Rotterdam.
- Ferreira Gomes, L. M. (2001). "Geotêxteis e suas aplicações". Seminário: A indústria têxtil nos caminhos da inovação, Universidade da Beira Interior, pp.10-20, Covilhã.
- IGS-Portugal (2009a). "Geosynthetics / Geossintéticos". Versão de 22 de Abril, www.spgeotecnia.pt/upload/docs, Consultado a 3 de Novembro de 2010 às 20:14h.
- IGS-Portugal (2009b). "Functions / Funções". Versão de 22 de Abril, www.spgeotecnia.pt/upload/docs, Consultado a 3 de Novembro de 2010 às 20:25h.
- Indraratna, B., Sakim, W., Khabbaz, H., *et al.* (2006). "Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization". *Journal of Ground Improvement*, pp.91-102.

- Koerner, R. M. (1998). "Designing with geosynthetics ". Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 4th edition 761p.
- Lim, W. L. (2004). "Mechanics of Railway Ballast Behaviour". Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham, 215p.
- Lopes, M. L. (2009). "Utilização de geossintéticos em estruturas de vias-férreas". 3º Seminário Português sobre Geossintéticos, Palestra, CD-ROM, ISBN-978-989-96466-0-5, 19p., Actas do 3º Seminário Português sobre Geossintéticos, ISBN-978-989-96466-1-2, pp. 23-41, Coimbra.
- Lopes, M. L., Monteiro, A. V. e Lopes, P. (2001). "Estudo da acção dos agentes atmosféricos em geotêxteis não tecidos". Revista das Associações Portuguesas dos Distribuidores de Água e para Estudos de Saneamento Básico – Águas & Resíduos, Ano V, Março/Julho, pp.11-16. Sintra.
- Lu, M. (2008). "Discrete Element Modelling of Railway Ballast". Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham, 245p.
- MPZ, A. T. L. (2010). "Geossintéticos - Uma indústria com crescimento explosivo". <http://www.mpz.com.br/mpzgeossinteticos.html>, Consultado em 21 de Setembro de 2010 às 22:05h.
- Nancey, A., Imbert, B. e Robinet, A. (2002). "Thick and abrasion resistant geotextile for use under the ballast in railways structure". Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 3, pp.1191-1194, Nice, France.
- Paula, A. M. V. (2003). "Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos. Universidade do Porto, FEUP, Porto, p.155p.
- Paula, A. M. V., Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. (2004). "Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Influência do material de confinamento". Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia nº 102, pp.71-83. Lisboa.
- Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. (2010). "A durabilidade dos geossintéticos". FEUP Edições, ISBN: 978-972-752-120-3, 294p.

- Pinho-Lopes, M. J. F. (2006). "Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão de solos e de estabilização de maciços com geossintéticos". Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Porto, FEUP, Porto,
- Pinto, A. E. S. (2005). "Aplicação de Geossintéticos em Linhas-Férreas: Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação. Universidade do Porto, FEUP, Porto, 168p.
- Raymond, G. P. (1999). "Railway rehabilitation geotextiles". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.17, pp.213-230.
- Rosete, A. J. C. P. (2010). "Durabilidade de geossintéticos em obras ferroviárias - Abrasão e DDI". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, DeCivil, Aveiro, 114p.
- Selig, E. T. e Waters, J. M. (1994). "Track geotechnology and substructure management". Thomas Telford., London,
- Shukla, S. K. (2002). "Geosynthetics and their applications". "Chapter on Fundamental of geosynthetics", Edited by S.K. Shukla, Thomas Telford, 430p.
- Tan, S. A. H. (2002). "Railway tracks". "Chapter on "Fundamental of geosynthetics", Thomas Telford Edited by S.K. Shukla,
- Van Dine, D., Williams, S. E. e Raymond, G. P. (1982). "An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles". *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles*, pp.811-816, Las Vegas, USA.
- Walls, J. C. e Galbreath, L. L. (1987). "Railroad ballast reinforcement using geogrids". In: *Proceedings of Geosynthetics'87*, Vol. 1, pp.38-45, New Orleans.
- Watn, A. e Chew, S. H. (2002). "Geosynthetic damage - from laboratory to field". *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Vol. 4, pp.1203-1226, Nice, France.

Documentos normativos:

EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007);

NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998).

EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008), emitida a 1 de Junho de 2008.

NP EN 933-1:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Análise granulométrica. Método de peneiração.

NP EN 1097-2:2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Métodos para a determinação da resistência à fragmentação.

NP EN 13450:2005 – Agregados para balastro de via-férrea.